КОВКА И ШТАМПОВКА 4

СПРАВОЧНИК

КОВКА И ШТАМПОВКА

СПРАВОЧНИК В 4-Х ТОМАХ

Редакционный совет:
Е.И. СЕМЕНОВ,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР
д-р техн. наук проф. (председатель),
О.А. ГАНАГО,
д-р техн. наук проф.
Л.И. ЖИВОВ,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
д-р техн. наук проф.
Г.Д. ЛЕПЕНШИН,
инж.
А.Д. МАТВЕЕВ,
д-р техн. наук проф.
Г.А. НАВРОЦКИЙ,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
д-р техн. наук проф.
И.Н. ФИЛЬКИН,
канд. техн. наук
лауреат Государственной премии СССР

ТОМ 4

ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА

Под редакцией
д-ра техн. наук проф.
А.Д. МАТВЕЕВА

МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1987

ББК 34.623
К56
УДК 621.73 (035)

Авторы тома: А. Ю. Аверкиев, Ю. А. Аверкиев, Е. А. Белов, А. А. Бугрова, З. Ф. Буйлова, С. И. Вдовин, Л. Н. Верховский, В. Л. Гельфонд, Ю. М. Гуров, Л. И. Живов, В. В. Каданников, Ю. Г. Калпин, М. Ф. Каширин, А. С. Маленичев, А. Д. Матвеев, Н. А. Матвеева, Ф. П. Михаленко, А. Ф. Нистратов, А. Г. Овчинников, И. П. Ренне, В. К. Сенько, Г. Д. Скворцов, О. В. Усольцев, Л. Г. Юдин, С. П. Яковлев

Рецензент тома д-р техн. наук **В. И. Ершов**

Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая
К56 штамповка/Под ред. А. Д. Матвеева; Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. — М.: Машиностроение, 1985—1987. — 544 с.: ил.

(В пер.): 2 р. 50 к.

В четвертом томе приведены классификация и методика расчета операций листовой штамповки, изложены основы проектирования технологических процессов. Даны рекомендации по выбору и оптимизации раскроя, применению смазочных материалов, определению деформационных, силовых и энергетических характеристик. Приведены расчеты параметров формоизменения и предельного формоизменения. Рассмотрены примеры расчета и проектирования технологических процессов. Представлены типовые конструкции штампов и рекомендации по их выбору, а также основные типы специализированного оборудования.

Справочник предназначен для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, может быть полезен преподавателям и студентам втузов.

К $\frac{2704030000\text{-}613}{038\ (01)\text{-}87}$ Подписное

ББК 34.623

СПРАВОЧНИК СПЕЦИАЛИСТА

Александр Юрьевич Аверкиев, Юрий Александрович Аверкиев, Ангелина Александровна Бугрова и др.

КОВКА И ШТАМПОВКА

Справочник (в 4-х томах)

Том 4

Листовая штамповка

Редактор *Т. Н. Леденева* Художественный редактор *С. С. Водчиц*
Обложка художника *А. Я. Михайлова* Технический редактор *Л. П. Гордеева*
Корректоры *Н. Г. Богомолова, А. М. Усачева*

ИБ № 3336

Сдано в набор 18.11.86. Подписано в печать 13.11.87. Т-09588. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага кн.-журнальная. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 34,0. Усл. кр.-отт. 34,5. Уч.-изд. л. 43,65. Тираж 20 677 экз. Заказ 262. Цена 2 р. 50 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение» 107076, Москва, Стромынский пер. 4

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

© Издательство «Машиностроение», 1987

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. **Операции листовой штамповки, основные параметры штампуемости** 7
1. Классификация операций листовой штамповки (*А. Д. Матвеев*) . . . 7
2. Основные параметры штампуемости (*Ю. Г. Калпин*) . . . 15

Глава 2. **Операции вырубки, пробивки, резки, зачистки** . . . 19
1. Вырубка, пробивка, резка, зачистка (*Ф. П. Михаленко*) . . . 19
2. Вырубка, пробивка при использовании эластичной среды (*Ф. П. Михаленко*) . . . 40
3. Чистовые резка, вырубка, пробивка (*Ю. М. Гуров, А. Г. Овчинников*) . . . 45
4. Точность деталей, изготовляемых с использованием операций вырубки, пробивки, зачистки (*А. Д. Матвеев*) . . . 51

Глава 3. **Гибка** . . . 54
1. Формоизменение заготовки, виды гибки (*А. Д. Матвеев*) . . . 54
2. Расчет технологических параметров (*А. Д. Матвеев*) . . . 56
3. Гибка в штампах (*А. Д. Матвеев*) . . . 85
4. Гибка на валковых машинах (*А. Д. Матвеев*) 100
5. Гибка труб и стержней со сложной формой поперечного сечения (*С. И. Вдовин*) . . . 104
6. Точность гибки (*А. Д. Матвеев*) . . . 111
7. Примеры расчета технологических параметров (*А. Д. Матвеев*) . . . 112

Глава 4. **Вытяжка осесимметричная** (*А. Д. Матвеев, А. Ю. Аверкиев*) 116
1. Формоизменение заготовки . . . 116
2. Скорости деформаций и напряжения . . . 117
3. Предельный коэффициент вытяжки . . . 118
4. Расчет геометрических параметров заготовки и инструмента . . . 121
5. Расчет силовых параметров, работа деформации . . . 125
6. Точность деталей, получаемых вытяжкой . . . 126
7. Пример расчета технологических параметров 127

Глава 5. **Многооперационная осесимметричная вытяжка** (*С. П. Яковлев, Л. Г. Юдин*) . . 130
1. Формоизменение заготовки . . . 130
2. Предельные коэффициенты вытяжки . . . 136
3. Расчет числа операций, геометрических параметров заготовки и инструмента 139
4. Расчет силовых параметров . . . 144
5. Точность деталей, получаемых многооперационной вытяжкой . . . 146

Глава 6. **Вытяжка деталей коробчатой формы** (*А. Г. Овчинников*) . . 149

Глава 7. **Вытяжка с утонением** (вытяжка—протяжка) (*В. Л. Гельфонд, И. П. Ренне*) 156
1. Формоизменение заготовки . . . 156

2. Формы получаемых деталей и инструмента 157
3. Условия возникновения брака 161
4. Расчет силовых и технологических параметров 162
5. Пример расчета технологических параметров . . . 170

Глава 8. **Обтяжка** (*В. В. Каданников, А. Д. Матвеев*) 174
1. Обтяжка широким листом инструмента с цилиндрической поверхностью . . 174
2. Обтяжка широким листом инструмента с поверхностью двойной кривизны 181
3. Осесимметричная обтяжка 186

Глава 9. **Отбортовка** (*Ю. А. Аверкиев, А. А. Бугрова*) . . . 191

Глава 10. **Обжим и раздача** (*Ю. А. Аверкиев*) 200
1. Обжим 200
2. Раздача 216

Глава 11. **Скручивание** (*Н. А. Матвеева*) 227

Глава 12. **Ротационная вытяжка** 234
1. Ротационная вытяжка на специализированном оборудовании (*Е. А. Белов, Л. Г. Юдин*) 234
2. Ротационная вытяжка тонкостенных цилиндрических деталей специальными устройствами (*Л. Г. Юдин, А. С. Маленичев*) 257

Глава 13. **Штампосборочные операции** (*А. Ю. Аверкиев*) 277

Глава 14. **Раскрой листового материала** (*В. К. Сенько, З. Ф. Буйлова*) 287

Глава 15. **Листовая штамповка с местным нагревом и в состоянии сверхпластичности** (*М. Ф. Каширин*) 304

Глава 16. **Штамповка неметаллических материалов** (*Ф. П. Михаленко*) 311
1. Особенности деформирования 311
2. Разделительные операции 313
3. Формоизменяющие операции 330

Глава 17. **Силы трения, смазывание и охлаждение при штамповке** (*А. Г. Овчинников*) 339

Глава 18. **Типовые конструкции штампов, основных узлов и деталей. Выбор материалов** (*Г. Д. Скворцов*) 348
1. Общие сведения 348
2. Штампы для разделительных операций 356
3. Гибочные штампы . . . 405
4. Штампы для вытяжки . . 418
5. Штампы для многопозиционных прессов 435
6. Штампы, совмещающие разделительные и формоизменяющие операции . . . 437
7. Выбор материалов для изготовления основных деталей штампов 442

Глава 19. **Стойкость штампов** (*Ф. П. Михаленко*) 451

Глава 20. **Специализированное листоштамповочное оборудование** (*А. Ф. Нистратов*) 474

Глава 21. **Выбор листоштамповочного оборудования** (*Л. И. Живов*) 503

Глава 22. **Построение технологических процессов** (*Л. Н. Верховский, О. В. Усольцев*) . . 519

Список литературы 531

Предметный указатель 534

Глава 1 ОПЕРАЦИИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ШТАМПУЕМОСТИ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Листовой штамповкой обрабатывают как металлические, так и неметаллические материалы. Металлический материал для листовой штамповки получают в основном в металлургическом производстве: прокаткой, волочением, прессованием, гибкой (профилированием), в виде листа, полосы, ленты различной ширины, свернутой в рулон, а также в виде сплошных и несплошных стержней, панелей, труб различных форм поперечного сечения и толщины (сортовой металл).

Из неметаллических материалов методами листовой штамповки обрабатывают бумагу, картон, натуральную и искусственную кожу, слоистые и неслоистые пластики, различные синтетические материалы.

При листовой штамповке исходная форма материала пластически изменяется. При этом обеспечиваются требуемые геометрическая точность формы, состояние, качество и точность поверхности.

Формоизменение осуществляется с помощью основных инструментов — пуансона и матрицы и вспомогательных — прижима, съемника, выталкивателя и т. д. Пуансон вдавливается в деформируемый материал, обтягивается, обтекается или охватывается им. Матрица вбирает в себя, охватывает изменяющий форму материал и пуансон.

Базовая поверхность матрицы, по отношению к которой строится и измеряется проем, называется *зеркалом матрицы*. Зеркало матрицы может быть плоским и искривленным. *Контуром проема матрицы* называется линия пересечения поверхности полости с базовой поверхностью.

Полость матрицы может быть глухая (с дном) и сквозная — в виде отверстия. Если полость сквозная, матрица имеет форму осесимметричного или неосесимметричного кольца. Такую матрицу называют *матричным кольцом*.

Пуансон и матрицу изготовляют, как правило, из более твердого и прочного материала, чем обрабатываемый. Вместе с тем один инструмент — пуансон или матрица — может быть из твердого материала, а другой из эластичного, легко поддающегося формоизменению.

Инструмент (пуансон или матрица) называется жестким, если он изготовлен из более твердого материала.

Исходный материал, предназначенный для последующей обработки, в виде тела определенной формы и размеров называется *заготовкой*.

В листовой штамповке применяют следующие виды формоизменения заготовки: растяжение, осадку, сдвиг, выглаживание, вдавливание (внедрение), гибку, вытяжку, вытяжку с утонением, ротационную вытяжку, обтяжку, местную формовку, отбортовку, фланцовку, обжим, раздачу, скручивание.

Растяжение — увеличение размера заготовки или ее части в заданном направлении.

Осадка — сокращение размера заготовки или ее части в заданном направлении.

Сдвиг — смещение (сдвиг) одной части заготовки относительно другой по поверхности сдвига, т. е. по поверхности (плоскости), пересекающей заготовку в направлении сдвига, причем соответствующие рабочие поверхности пуансона и матрицы движутся относительно друг друга в этой поверхности (рис. 1, *а*). Смещение может осуществляться и по двум плоскостям (поверхностям), в которых имеет место относительное движение рабочих поверхностей инструмента (рис. 1, *б*, *в*). Когда зазор *z* между поверхностями сдвига положительный

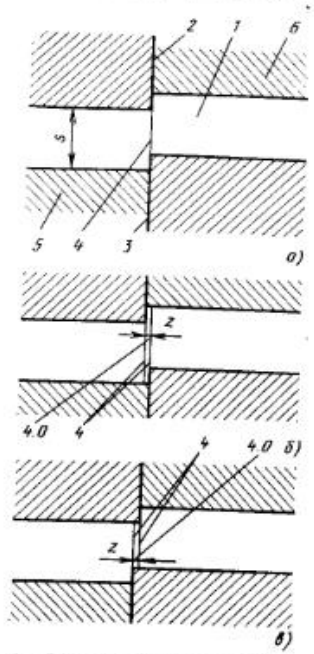


Рис. 1. Формоизменение сдвигом:
1 — заготовка; *2* — рабочая поверхность пуансона; *3* — рабочая поверхность матрицы; *4* — поверхность сдвига; *4.0* — область в зазоре (между поверхностями сдвига) *5*, *6* — прижимы

(см. рис. 1, *б*), область, расположенная в зазоре, увеличивается в своем объеме за счет удлинения в направлении сдвига. Когда зазор *z* отрицательный (см. рис. 1, *в*), область в зазоре осаживается в направлении сдвига, ее объем сокращается.

Пластическая деформация частиц материала сосредоточена в узкой зоне около поверхностей сдвига. Наиболее интенсивно деформируются частицы, расположенные у лезвий (режущих кромок) инструмента, по поверхностям сдвига и в области зазора. Граница областн, внутри которой интенсивность деформации $\varepsilon \geqslant 0{,}005$, отдалена от поверхности сдвига на расстояние, не превышающее 0,3—0,5 размера сечения заготовки, измеряемого в направлении сдвига (смещения). При сдвиге по схеме, показанной на рис. 1, *б*, в зоне деформации преобладают растягивающие напряжения, а по схеме на рис. 1, *в* — сжимающие.

В поверхности сдвига находятся сечения и той и другой частей тела. Контуры этих сечений движутся, смещаются друг отиосительно друга, расходятся. Когда они полностью разойдутся (не будет участков наложения одиого контура на другой), произойдет геометрическое разделение тела. Физическое разделение может произойти раньше в результате разрушения материала. Обычно это имеет место при сдвиге по схеме, показанной на рис. 1, *б*. Трещины разрушения зарождаются у режущих кромок, движутся навстречу друг другу и сливаются в одну, разделяющую материал, если зазор *z* имеет оптимальное значение. При сдвиге по схеме, показанной на рис. 1, *в*, трещины у режущих кромок могут не зарождаться или зарождаться, но не расти, т. е. иметь ограниченное распространение. Тогда величина смещения для геометрического и физического отделения одной части тела от другой будет одна и та же.

Усилие, необходимое для сдвига одной части заготовки относительно другой, вычисляют как произведение площади сечения заготовки поверхностью, в которой происходит сдвиг, на сопротивление материала сдвигу.

Сопротивление сдвигу определяется в технологической пробе материала на вырубку—пробивку сдвигом по схеме, показанной на рис. 1, *б*, при оптимальном значении зазора. Оно представляет собой условное касательное напряжение, взятое по результатам пробы как отношение максимального усилия сдвига к площади сечения материала поверхностью сдвига.

Сдвиг переходит в срезание (резание), если с одной стороны от поверхности сдвига располагается технологический припуск в виде слоя небольшой толщины δ (по отношению к толщине s материала), измеряемой от этой поверхности. При движении инструмента, находящегося с этой стороны, пластическая деформация в процессе срезания сосредотачивается в области его режущей кромки. Размер области в направлении движения инструмента равен примерно δ. Другой инструмент почти в течение всего процесса срезания служит только опорой

для материала и вступает в действие, когда сокращающееся расстояние между режущими кромками приближается к δ. Напряженно-деформированное состояние в области пластической деформации в это время изменяется, принимая характер, присущий сдвигу, так, что оставшаяся часть припуска сдвигается по оставшейся части поверхности отделения (сдвига).

Срезание используют в штамповочных операциях зачистки для повышения качества и точности обрабатываемой поверхности (поверхности отделения) материала, а также для удаления слоя материала, упрочненного и поврежденного в предшествующей разделительной операции. Толщина упрочненного приповерхностного слоя после зачистки составляет $(0{,}1 \div 0{,}03)\,\delta$.

Выглаживание поверхности заготовки представляет собой приповерхностное формоизменение, в результате которой сокращаются геометрические микро- и макронеровности поверхности за счет перераспределения материала. Точность расположения обрабатываемой поверхности относительно других поверхностей заготовки не повышается или повышается незначительно. Прочность материала в приповерхностном слое в этом случае увеличивается.

Вдавливание (внедрение) — формоизменение заготовки, возникающее при вдавливании в нее индентора. Роль индентора может выполнять пуансон или же специальный выступ на рабочей поверхности пуансона или матрицы. В результате местного пластического перераспределения материала у поверхности контакта индентора с заготовкой на последней получается отпечаток по форме индентора. Если, например, индентор имеет форму клина (длинной трехгранной призмы) и глубина его внедрения равна толщине заготовки (или исходного материала), произойдет геометрическое отделение одной части заготовки от другой. Физическое отделение может произойти и при меньшей глубине внедрения — в результате разрушения (разрыва) материала под индентором.

Гибка — формоизменение, основное назначение которого состоит в изменении кривизны всей или части заготовки в плоскости гибки. Изменение кривизны в плоскости гибки может сопровождаться неизбежным изменением кривизны в другой, ортогональной плоскости. Гибка может сопровождаться также изменением продольного размера заготовки в плоскости гибки и размера ее поперечного сечения в направлении, перпендикулярном к плоскости гибки.

Разновидности гибки по направлению и очередности изменения кривизны следующие.

Изгиб — увеличение кривизны заготовки, разгиб — уменьшение ее кривизны.

Спрямление — уменьшение кривизны заготовки до нулевого значения.

Перегиб — изгиб заготовки, который следует после спрямления кривизны.

Знакопеременная гибка — изменение кривизны, в ходе которого меняется знак ее приращения. Например, изгиб, затем разгиб не до нулевой кривизны, затем изгиб и т. д., или изгиб, спрямление, перегиб, спрямление, изгиб, спрямление и т. д. Цикл знакопеременной гибки — замкнутая часть знакопеременного изменения кривизны. Кривизна в начале и конце цикла — одна и та же (по величине и по направлению). Цикл симметричный, если кривизна проходит через нулевое значение; ее уход от нулевого значения в том и другом направлении один и тот же. Гибка путем вращения изогнутого стержня вокруг его продольной, также изогнутой оси. Гибка с продольным растяжением или сжатием — изменение кривизны, сопровождающееся принудительным удлинением или укорочением заготовки в плоскости гибки. Гибка с осевым растяжением или сжатием — изменение кривизны, сопровождающееся принудительным изменением размера поперечного сечения в направлении, перпендикулярном к плоскости гибки.

Разновидности по назначению следующие.

Безоправочная завивка стержня в спираль. Навивка стержня на оправку. Сопровождаются закручиванием стержня, если еще не завитая часть стержня не может вращаться относительно своей продольной оси.

Закатка края тонкостенной оболочки, т. е. превращение краевой части

цилиндрической оболочки в тороидальную. Завивка краевой части листа — придание ей формы цилиндрической оболочки.

Правка гибкой — доведение кривизны стержня, цилиндрической оболочки или коробленого листа до нулевого значения или до заданного.

Вытяжка — формоизменение листовой заготовки в чаше- или коробообразную оболочку или заготовки в виде такой оболочки в более глубокую оболочку, происходящее за счет втягивания пуансоном в матрицу части материала, находящегося на зеркале за контуром проема (полости) матрицы, и растяжения другой части, находящейся внутри контура. Зазор между поверхностями полости (проема) матрицы и пуансона должен быть больше или равен толщине стенки образовавшейся оболочки. Часть материала, находящаяся на зеркале матрицы, называется фланцем. При вытяжке особо тонкостенных оболочек возникает опасность коробления фланца, образования на нем волн. Тогда применяют устройство в виде прижимного кольца, фланец располагают между прижимными поверхностями кольца и матрицы. В процессе вытяжки фланец вытягивается из-под прижимного кольца и втягивается в матрицу.

Имеются следующие разновидности вытяжки.

Осесимметричная вытяжка — вытяжка оболочки из осесимметричной заготовки осесимметричными пуансоном и матрицей. Но вытягиваемая оболочка обычно не является строго осесимметричной, так как вследствие плоскостной анизотропии листового материала и других причин осевая симметрия процесса формоизменения нарушается. Неосесимметричная вытяжка — вытяжка неосесимметричной оболочки. Обычно так называют вытяжку коробообразных оболочек, имеющих две плоскости симметрии (или одну). Сложная вытяжка — вытяжка оболочки сложной формы, обычно не имеющей ни одной плоскости симметрии. Многооперационная вытяжка — вытяжка оболочки, для формообразования которой необходимо несколько операций. Вытяжка с утонением стенки — получение детали типа стакана, состоящее в увеличении его высоты за счет утонения стенки, получаемого протягиванием стенки через зазор между поверхностями пуансона и матрицы.

Комбинированная вытяжка — соединяет в себе два вида формоизменения, протекающие одновременно под воздействием одного и того же инструмента: собственно вытяжку и вытяжку с утонением.

Вытяжка ротационная — формоизменение вращающейся круглой листовой заготовки в осесимметричную оболочку или заготовки в виде такой оболочки в оболочку другой формы и толщины. Осуществляется за счет последовательного смещения материала под действием сосредоточенной нагрузки со стороны инструмента, движущегося относительно заготовки по траектории, представляющей собой винтовую линию на поверхности вращения соответствующей формы. В процессе формообразования форму оболочки обычно задают с помощью жесткой оправки. Требуемую траекторию движения инструмента относительно заготовки обеспечивают вращением оправки с заготовкой и подачей инструмента в плоскости, параллельной оси вращения, по кривой (или прямой), которая соответствует образующей оболочки.

Обтяжка — формоизменение листовой заготовки в оболочку, состоящее в ее растяжении и одновременном обтягивании по пуансону.

Местная формовка — формоизменение обтяжкой относительно небольшого участка листовой заготовки.

Отбортовка — формоизменение, при котором часть листовой заготовки, расположенная вдоль ее замкнутого или незамкнутого контура, под действием пуансона смещается в матрицу, одновременно растягивается, поворачивается и превращается в борт. Образование борта из области, расположенной вдоль выпуклого замкнутого или незамкнутого контура листовой заготовки, представляет собой неглубокую вытяжку, а вдоль прямолинейного контура — гибку.

Обжим — формоизменение трубы, в результате которого укорачивается и сужается контур поперечного сечения на отдельном кольцевом участке или по всей ее длине.

Раздача — формоизменение трубы, в результате которого удлиняется и расширяется контур поперечного сечения на отдельном кольцевом участке или по всей ее длине.

Фланцовка — образование фланца по краю оболочки; в частности, раздача концевого участка трубы с разворачиванием образующей участка на угол, достигающей 90° и более, является разновидностью фланцовки.

Скручивание — формоизменение заготовки, возникающее при повороте ее сечений, ограничивающих участок скручивания, относительно друг друга вокруг заданной оси.

Калибровка — отделочное формоизменение полуфабриката, необходимое для доведения его геометрии и качества поверхности до заданных.

С помощью перечисленных видов формоизменения заготовки заданную форму можно получить либо при отделении технологического припуска, либо при направленном перераспределении (перетекании) материала заготовки внутри ограничивающей ее поверхности, изменяющей свою форму и площадь.

Для отделения припуска при разделении какого-либо материала (листов, ленты, труб и т. д.) на части применяют сдвиг, внедрение, локализованный изгиб с растяжением, а для перераспределения материала — все виды формоизменения.

Разделение (отделение) происходит по поверхности разделения (отделения), которая может быть трех видов:

не иметь признаков разрушения материала в приповерхностном слое;

представлять собой поверхность трещины (скола), по которой разрушился материал;

представлять собой комбинацию первых двух видов поверхностей.

Линия пересечения поверхности разделяемого материала с поверхностью разделения (отделения) представляет собой контур разделения (отделения).

Некоторые виды формоизменения могут быть использованы для получения неразборных соединений заготовок или деталей (гибка, отбортовка, обжим, фланцовка, местная формовка, сдвиг).

Количественно формоизменение оценивается коэффициентом формоизменения. Коэффициент отражает относительное изменение геометрического параметра, характерного для данного вида формоизменения. Наибольшее возможное формоизменение оценивается предельным коэффициентом формоизменения.

Факторы, ограничивающие формоизменение заготовки: разрушение материала по исчерпании его пластичности; возникновение волн, выпучин на участках заготовки, находящихся под воздействием сжимающих сил; локализация деформации и резкое сужение сечения на участках заготовки, находящихся под воздействием растягивающих сил; упрочнение металла, если оно оговорено техническими условиями на деталь.

Для различных частиц тела пластичность может быть различной. Мерой пластичности является деформация разрушения — интенсивность деформаций ε_p, накопленная материалом за рассматриваемый период, закончившийся разрушением частицы.

Разрушение частицы тела при пластической деформации есть результат накопления материалом тела таких повреждений, как поры, микротрещины внутри зерен и по их границам. При рассмотрении механизма разрушения частицу тела принимают малой по отношению к размерам тела, но достаточно большой по отношению к размерам отдельного зерна или другого элемента микроструктуры, содержащей тысячи зерен. По мере увеличения деформации процесс роста площади поверхности каждого повреждения может перейти к процессу объединения ряда повреждений (микротрещин, пор, разрывов). При этом скорость роста площади поверхности объединенных повреждений резко увеличивается. Они образуют одну макротрещину, которая и разделяет частицу, разрушает ее. Последующее разрастание макротрещин и их объединение приводит к разрушению тела в целом. На пластичность влияют в основном давление, с которым на нее давят соседние частицы, скорость деформации,

температура, деформация, накопленная за период, предшествующий рассматриваемому, и ее градиент, вид напряженного состояния (частицы), а также внешние факторы — воздействие агрессивной среды, радиоактивное облучение и т. д. Мерой давления на частицу со стороны окружающих частиц служит отношение среднего нормального напряжения $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ к интенсивности напряжения σ. Пластичность материала определяют экспериментально. Серии образцов деформируют до разрушения при различных значениях $(\sigma_0/\sigma)_j$ ($j = 1, 2, 3, \ldots$), но для каждой серии это значение должно быть постоянно пое, т. е. $(\sigma_0/\sigma)_j(\varepsilon) = (\sigma_0/\sigma)_j^c = \text{const}$, причем деформация образца должна быть близкой к однородной (чтобы исключить влияние ее градиента). В результате для ряда значений $(\sigma_0/\sigma)_j^c$ получают ряд значений $(\varepsilon_p^c)_j$, по которому строят зависимость $\varepsilon_p^c(\sigma_0/\sigma)^c$. График этой зависимости называют диаграммой пластичности или кривой пластичности материала.

В случае, когда рассматриваемая частица тела деформируется при $\sigma_0/\sigma = \text{const}$, отношение накопленной ею интенсивности деформации к деформации разрушения называют коэффициентом снижения пластичности:

$$\psi = \varepsilon/\varepsilon_p \quad 0 \leqslant \psi \leqslant 1. \qquad (1)$$

При $\psi = 1$ частица разрушается. Если же $(\sigma_0/\sigma)(\varepsilon) \neq \text{var}$, коэффициент снижения пластичности вычисляют по формуле

$$\psi = \int_0^{\varepsilon} d\varepsilon/\varepsilon_p^c, \qquad (2)$$

где $\varepsilon_p^c = \varepsilon_p^c(\sigma_0/\sigma)^c = \varepsilon_p^c(\varepsilon)$ — координата точки на диаграмме пластичности, представленная в виде функции от ε с помощью подстановки $(\sigma_0/\sigma)^c = (\sigma_0/\sigma)(\varepsilon)$.

Деформацию ε_p определяют из уравнения

$$\int_0^{\varepsilon_p} d\varepsilon/\varepsilon_p^c = 1. \qquad (3)$$

Сверхпластичность — состояние материала, при котором имеет место необычно большое удлинение образца в испытании на одноосное растяжение. В этом состоянии напряжение течения материала сильно зависит от скорости деформации, что приводит к замедлению развития неравномерности растяжения образца и запаздыванию локализации деформации.

Многие металлические сплавы могут находиться в состоянии сверхпластичности в определенных интервалах температур и скоростей деформации. Пластичность материала в состоянии сверхпластичности по сравнению с его пластичностью при горячей деформации не повышается или повышается, но незначительно.

Возникновение волн, выпучин наблюдается на участках заготовки, находящихся под воздействием сжимающих сил и не имеющих двустороннего контакта с жесткими поверхностями инструмента. Во многих случаях такой контакт может быть обеспечен при дополнительном введении в состав инструмента прижимов, держателей, элементов подпора и т. п.

Локализация деформации присуща следующим видам формоизменения: растяжению, гибке с растяжением, вытяжке, обтяжке и местной формовке, раздаче, отбортовке. Ее развитие зависит в основном от вида и разновидностей формоизменения заготовки, упрочняемости металла как по деформации, так и по ее скорости, исходных разнотолщинности листовой заготовки и неоднородности пластических свойств металла, неравномерности распределения деформации, соотношения между главными деформациями ε_1 и ε_2 в направлениях растяжения (см. гл. 8).

Штамповочная операция является частью технологического процесса формоизменения заготовки. За каждую операцию осуществляется определенный вид формоизменения с заданным коэффициентом формоизменения.

Штампуемость, т. е. обрабатываемость листового материала пластической деформацией в определенной штамповочной операции, зависит от технологических свойств материала и оценивается рядом показателей, набор которых зависит от масштаба производства, его технического уровня и конкретных требований к изделию. Оценка штампуемости материала является сравнительной, т. е. выполняется сравнением со штампуемостью другого взятого за эталон листового материала.

Технологические свойства листового материала включают в себя часть механических, физических свойств и данные о составе материала как вещества, отдельные показатели его микро- и макроструктур, точности изготовления как тела, микрогеометрии поверхности, ее физико-химического состояния, степень однородности (равномерности распределения) этих свойств и показателей по телу (по координатам) и их стабильность по времени.

Показателями штампуемости являются коэффициент наибольшего формоизменения, качество обработки, экономичность использования материала, стойкость инструмента, стоимость инструмента и его обслуживания, силовые, энергетические и другие материальные затраты, условия труда.

Определение операций по ГОСТ 18970—84. 1. Отрезка — полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру.

2. Разрезка — разделение заготовки на части по незамкнутому контуру.

3. Вырубка — полное отделение заготовки или изделия от исходной заготовки по замкнутому контуру.

4. Пробивка — образование в заготовке отверстия или паза путем сдвига с удалением части материала в отход.

5. Обрезка — удаление излишков металла путем сдвига.

6. Чистовая вырубка — вырубка в условиях всестороннего неравномерного сжатия в зоне разделения материала.

7. Чистовая пробивка — пробивка в условиях всестороннего неравномерного сжатия в зоне разделения материала.

8. Проколка — образование в заготовке отверстия без удаления материала в отход.

8. Высечка — полное отделение заготовки или изделия от исходной заготовки по замкнутому контуру путем внедрения инструмента.

10. Просечка — образование отверстия в заготовке путем внедрения инструмента с удалением части материала в отход.

11. Зачистка — удаление технологических припусков с помощью штампа с образованием стружки для повышения точности размеров и уменьшения шероховатости поверхности штампованной заготовки.

12. Гибка — образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы.

13. Вытяжка — образование полой заготовки или изделия из плоской или полой исходной листовой заготовки.

14. Вытяжка с утонением — вытяжка полой заготовки с обусловленным уменьшением толщины стенок исходной полой заготовки без изменения ее внутреннего диаметра.

15. Вытяжка ротационная — вытяжка при относительном вращении инструмента и заготовки.

16. Комбинированная вытяжка — вытяжка плоской или полой заготовки с обусловленным уменьшением толщины стенок и с изменением диаметра полой заготовки.

17. Обтяжка — образование заготовки заданной формы приложением растягивающих усилий к ее краям.

18. Формовка — образование рельефа в листовой заготовке за счет местных растяжений без обусловленного изменения толщины материала.

19. Отбортовка — образование борта по внутреннему и (или) наружному контуру заготовки.

20. Обжим — уменьшение размеров поперечного сечения части полой заготовки путем одновременного воздействия инструмента по всему ее периметру.

21. Раздача — увеличение размеров поперечного сечения части полой заготовки путем одновременного воздействия инструмента по всему периметру.

22. Скручивание — поворот части заготовки вокруг продольной оси.

23. Правка — устранение искажений формы заготовки (детали) пластическим деформированием.

24. Калибровка — повышение точности размеров штампованной заго-

товки и уменьшенне шероховатостн ее поверхности.

Для отделения (разделения) материала в операциях 1—7 применяют формоизменение сдвигом. Восьмую операцию осуществляют локализованным изгибом и растяжением материала на вершине конического пуансона. Появившееся здесь точечное разрушение материала распространяется затем по исходящим от вершины трещинам. Операцин 1—7 можно также осуществить локализованным изгибом и растяжением материала до его разрыва около острой рабочей кромки пуансона или матрицы. Чистовые вырубку и пробивку осуществляют путем сдвигового формоизменения; при этом обеспечивается поверхность разделения первого вида, т. е. без признаков разрушения материала в приповерхностном слое. Операции высечки и просечки осуществляют вдавливанием в разделяемый материал индентора (ножа).

Операция, в которой пластическое формоизменение используется для получения неразборного соединения двух и более заготовок или деталей, называется штампо-сборочной.

Операция, используемая для получения заготовки, называется заготовительной.

Технологический процесс лнстовой штамповки чаще всего начинается с операцин раскроя материала.

Раскрой материала — разделение материала на части (или отделение от него частей) определенной, необходимой для получения детали формы. Отделенные части могут являться заготовками для дальнейшей обработки или же готовыми деталями. Операций раскроя может быть несколько. Например, раскрой листа на полосы, затем раскрой полосы на заготовки.

Раскрой материала, в результате которого одновременно получают заготовки (детали) разной заданной формы, называют групповым.

Операция раскроя является заготовительной, если результатом являются заготовки.

Вместе с частями определенной требуемой формы при раскрое материала обычно отделяются другие части, непригодные для получения соответствующей детали и представляющие собой отход раскроя. Он является деловым отходом, если затем используется как материал для получения другой заготовки или детали.

Проектирование (разработка) раскроя заключается в выборе оптимального положения заготовок (деталей) в исходном материале. При этом параметрами оптимизации могут быть плотность размещения заготовок в исходном материале, материальные затраты на осуществление разделения и др.

Мерой плотности размещения (заполнения) служит коэффициент использования материала — отношение объема заготовок к объему раскраиваемого материала.

В технологический процесс штамповки обычно входят вспомогательные операции: смазывание; нанесение покрытий, удерживающих смазочный материал; зачистка заусенцев различными способами; обезжиривание; промывка и др.

При необходимости вводят операции термообработки — отжиг начальный и межоперационный, закалку, отпуск и др., а также отделочные, декоративные и антикоррозионные операции обработки поверхности и операции нанесения покрытий.

Комплект инструмента, состоящий из пуансона, матрицы и вспомогательных деталей, предназначенный для одной операции, входит в штамп и располагается в нем в определенной позиции. В штампе может быть один или несколько таких комплектов; они могут располагаться как в разных, так и в одной позиции. Штамп состоит из двух основных частей, движущихся при его работе друг относительно друга. Детали, входящие в комплект, располагаются и в той, и в другой его частях. За один ход штампа части сходятся, сближаются и расходятся в исходное относительное положение; при этом на каждой позиции выполняется столько операций, сколько комплектов инструмента в ней расположено. Операции выполняются обычно в период сближения частей штампа и рабочих элементов штампа пуансона и матрицы. Формоизменение заготовки на позиции выполняется за рабочий ход пуансона (относительно матрицы), занимающий часть хода штампа. Операции выполняются последовательно, если заготовка переносится с позиции на позицию после выполнения каждой операции, и совмещенно, если заготовка остается на одной позиции. За каждый ход штампа выполняются операции на всех позициях.

Технологичность изделия. В целях обеспечения высокого качества изделия, его служебных характеристик (технических требований к изделию) и минимальной себестоимости при разработке конструкции изделия, выборе геометрических соотношений формы, вида и механических характеристик исходного материала необходимо учитывать следующие факторы: технологические возможности и особенности штамповочных операций в предлагаемых вариантах технологического процесса; уровень технической оснащенности и состояния машин штамповочного и инструментального подразделений; возможности выбора материалов для штампов. Понятие «технологичность изделия» включает в себя сравнительную (качественную) оценку полноты этого учета.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ШТАМПУЕМОСТИ

Упрочнение и пластичность листового металла. Экспериментальные зависимости интенсивности напряжений σ от интенсивности деформаций ε получают по результатам испытаний образцов на растяжение, сжатие или кручение. В расчетах обычно используют аналитические аппроксимации этих зависимостей.

Степенная аппроксимация

$$\sigma = A(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n; \qquad (4)$$

при $\varepsilon_0 = 0$

$$\sigma = A\varepsilon^n. \qquad (5)$$

Линейная аппроксимация

$$\sigma = \sigma_{т0} + \Pi\varepsilon, \qquad (6)$$

где n и Π — константы материала (табл. 1 и 2);

$$A = \sigma_в \left(\frac{e}{n}\right)^n; \quad \varepsilon_0 = \left(\frac{\sigma_{0.2}}{A}\right)^{1/n}.$$

Среднее значение n для ферритных коррозионно-стойких сталей можно рассчитать по уравнению [37]

$$n = 1{,}199 - 0{,}062\ (\%\ C) - 0{,}016\ (\%\ Mn) + 0{,}014\ (\%\ Si) + 0{,}0005\ (\%\ Cr) - 0{,}021\ (\%\ Mo) + 0{,}0067\ (\%\ Nb) + 1{,}12\ (\%\ Cr - 0{,}097)^2 - 0{,}033\ (\%\ Nb - 0{,}5)^2 + 0{,}089\ (\%\ C - 0.097)\ (\%\ Cr - 17{,}05).$$

Для сталей

$$\sigma_{т0} = 15 + 0{,}9\sigma_в;$$

для медн и ее сплавов

$$\sigma_{т0} = 2{,}25 + 1{,}38\sigma_в;$$

для алюминия и его сплавов

$$\sigma_{т0} = 1{,}325\sigma_в - 2.$$

При горячем деформировании интенсивность напряжений зависит в основном от интенсивности скоростей деформации $\dot{\varepsilon}$. Эту зависимость принято аппроксимировать следующей формулой:

$$\sigma = \sigma_н \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_н}\right)^m, \qquad (7)$$

где $\sigma_н$ — интенсивность напряжений при скорости деформации $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_н$, при постоянной температуре $m = \text{const}$ (табл. 3—5).

Для большинства металлов показатель m связан с относительной температурой $\theta = T/T_{пл}$:

$$m = m_\theta \theta,$$

где T и $T_{пл}$ — температура испытания и температура плавления по Кельвину.

Коэффициент m_θ зависит от химического состава сплава: для сталей углеродистых, хромоникелевых и легированных перлитного класса он составляет 0,0444; марганцовистых, хромованадиевых и хромомолибденовых — 0,0455; хромистых и сталей с переходной структурой — 0,0435; хромоникель-молибденовых и

1. Механические свойства некоторых листовых материалов

Материал	Предварительная обработка	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	n
Техническое железо	Отжиг	180—250	100—140	0,276
Сталь:				
08кп	Горячая прокатка	300	180	0,237
10	То же	340	210	0,22
15	»	380	230	0,224
20	»	420	250	0,218
25	»	460	280	0,177
30	»	500	300	0,177
35	»	540	320	0,173
45	»	610	360	0,173
50	»	640	380	0,168
Ст3	—	380—490	250	0,23
10Г2	Отжиг	450	300	0,19
65Г	Горячая прокатка	750	440	0,156
12Х18Н9Т	Закалка в воде	520	200	0,39
10Х17Н13М2Т	То же	500	200	0,365
Медь М2	Отжиг	230	51	0,47
Латунь Л63	»	360	110	0,406
Алюминиевые сплавы:				
АД1	»	80	50—80	0,194
АМг2М	»	190	100	0,26
АМг6	»	320	160	0,26
Титан ОТ4	Отжиг в вакууме	700—850	550—650	0,128
Цинк Ц1	Отжиг в кипящей воде	70—100	—	0,218
Никель	Отжиг	400—500	120	0,357
Олово	—	20	12	0,1386

2. Значения коэффициента П

Группа стали	Термическая обработка	П
Углеродистая с содержанием углерода, %:		
до 0,35	Отжиг	0,13—0,17
0,35—0,7		0,2—0,24
до 0,35	Нормализация, горячая прокатка	0,22—0,27
0,35—0,7		0,35—0,4
Легированная конструкционная	Отжиг	0,18—0,27
	Горячая прокатка	0,25—0,3
	Нормализация	0,3—0,4

хромо-никель-ванадиевых — 0,0485; никелевых и стабильных аустенитных — 0,045; нестабильных аустенитных — 0,0465; ферритных и полуферритных — 0,043; карбидного класса — 0,0475.

На рис. 2 представлены кривые пластичности $\varepsilon_p^c (\sigma_0/\sigma)^c$ некоторых листовых материалов, их можно аппроксимировать зависимостью вида

$$\varepsilon_p^c = 2\varepsilon_{p.p} \exp\left[-2{,}16\,(\sigma_0/\sigma)^c\right], \quad (8)$$

где $\varepsilon_{p.p}$ — деформация при разрушении образца в испытании на одноосное растяжение.

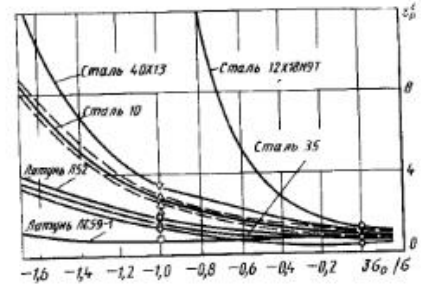


Рис. 2. Диаграмма пластичности листовых материалов (штрихами показаны границы доверительного интервала для стали 10, вероятность 0,9)

3. Значения $\sigma_н$ (МПа) при $\dot{\varepsilon}_н = 5 \cdot 10^{-4}$ с$^{-1}$ и $\varepsilon \approx 0{,}2$

Сталь	Температура, °С						
	600	700	800	900	1000	1100	1200
Ст3	160	112	80	50	30	21	15
Ст5	200	124	82	52	36	22	15
10	140	98	68	47	32,5	22,6	15,8
50	215	136	86	56	35,5	22,8	14,6
У8	228	144	93	61	38	24	15,9
У10	235	150	93	58	37	21,5	13
У12	240	149	92	58	38	23	14
40Х	220	139	86	57,5	36,5	23,2	15
30Г	196	126	83	54,5	35,5	23,2	15,2
60Г	225	140	87	58	36	23	15
60С2	300	189	120	77	49,6	31,5	20
25СГ	213	140	93	62	40,5	27	18
30ХГС	265	170	108	69	44	28	18
12Х18Н9Т	410	262	166	108	70	45	29

4. Значения $\sigma_н$ (МПа) и m при $\dot{\varepsilon}_н = 1$ с$^{-1}$

Сплав	Температура, °С									
	250		300		350		400		450	
	$\sigma_н$	m	$\sigma_н$	m	$\sigma_н$	m	$\sigma_н$	m	$\sigma_н$	m
Д16	206	0,0541	173	0 0562	133	0 069	102	0,0719	70	0,0764
АМг6	197	0,0634	167	0 0728	127	0,1	116	0,11	74	0,131

5. Деформационно-скоростные характеристики некоторых сплавов

Сплав	Исходное состояние: Обработка	Исходное состояние: Зерно, мкм	Температура испытания, °С	$\varepsilon_н$, $с^{-1}$	$\sigma_н$, МПа	m
ЦА22	В состоянии поставки	1	250	$4 \cdot 10^{-2}$	15	0,54
Л59	ТМО	2—3	600	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	2,5	0,6
ЛАХ59-0,5-0,2	ТМО	1—2	550	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	9	0,55
БрАЖ9-4	Холодная прокатка, отжиг при 800 °С 0,5 ч	—	800	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$	4	0,5
ВТ3-1	В состоянии поставки	2—5	940	$7 \cdot 10^{-4}$	6	0,87
	Прокатка в (α + β)-области	~2,5	850	$4 \cdot 10^{-4}$	20	0,7—0,8
	То же	Пластины	925	$7{,}4 \cdot 10^{-4}$	22,5	0,46
	Прокатка в β-области	Корзиночное плетение	925	$7{,}4 \cdot 10^{-4}$	30,4	0,4
	ТМО	~2,5	850	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$	22	0,48
ВТ6	В состоянии поставки	5—10	870	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$	25	0,8
	Прокатка в (α + β)-области	2,5	850	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	30	0,85
	ТМО	~1	900	10^{-3}	4	0,67
ВТ9	Прокатка в (α + β)-области	2,5	900	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	40	0,8
	Горячая прокатка	—	950	$2 \cdot 10^{-3}$	29	0,6
ВТ14	То же	5—7	850	$4 \cdot 10^{-4}$	10	0,8
	ТМО	1,2	875	$5 \cdot 10^{-3}$	6	0,7
ВТ16	Прокатка в (α + β)-области	—	800	$3 \cdot 10^{-4}$	30	0,35
ВТ20	В состоянии поставки	—	900	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$	40	0,32
ВТ22	Прокатка в (α + β)-области	—	860	$5 \cdot 10^{-4}$	20	0,5
АМг6	Холодная прокатка, отжиг	9—10	420	10^{-4}	5	0,45
В96ц	Теплая прокатка	~5	470	10^{-3}	5	0,6
МА2-1	Горячая прокатка	15	420	$5 \cdot 10^{-4}$	17	0,42
МА8	Холодная прокатка, отжиг при 400 °С	10	400	10^{-3}	20	0,43
НП2	В состоянии поставки	4	800	$5 \cdot 10^{-3}$	85	0,38

Глава 2 ОПЕРАЦИИ ВЫРУБКИ, ПРОБИВКИ, РЕЗКИ, ЗАЧИСТКИ

1. ВЫРУБКА, ПРОБИВКА, РЕЗКА, ЗАЧИСТКА

Процесс разделения деформируемого металла штампами в разделительных операциях листовой штамповки в определенной мере аналогичен процессу разделения ножницами. В данном случае рабочие части штампа (пуансона и матрицы) являются как бы ножами замкнутой конфигурации, имеющими сопряженные режущие кромки. Общим для обоих видов резки является то, что процесс разделения деформируемого материала состоит из трех стадий: упругой, пластической и скалывания (разрушения). Однако процессы разделения имеют и некоторые различия.

В процессе выполнения разделительной операции рабочие части штампа подвергаются воздействию сил, равных по величине, но направленных противоположно силам, с которыми они воздействуют на деформируемую заготовку. При этом инструмент деформируется упруго.

При отсутствии прижима обрабатываемого материала к рабочим поверхностям штампа (рис. 1) изгибающий момент от нормальных сил ($P_{т.п}$, $P_{т.м}$) воспринимается только материалом и поверхностями инструмента по контактным пояскам пуансона ($b_п$) и матрицы ($b_м$). Обрабатываемый материал изгибается, и к его поступательному относительному перемещению добавляется вращательное, что приводит к появлению нормальной силы на боковой поверхности пуансона ($P_{б.п}$) со стороны блестящего пояска отхода. Наличие нормальной силы $P_{б.м}$ на боковой поверхности рабочего окна матрицы вызывается упругим последействием местного изгиба волокон отделяемой части заготовки в зоне, прилегающей к поверхности сдвига. Наряду с указанным на контактных боковых и торцовых поверхностях пуансона и матрицы действуют силы трения ($T_{т.п}$, $T_{б.п}$, $T_{т.м}$, $T_{б.м}$). При этом условия работы режущих кромок рабочих частей штампа и всего инструмента значительно ухудшаются по сравнению с условиями, которые имеют место при наличии надежного прижима материала к рабочим поверхностям штампа.

Процесс разделения характеризуется формой очага деформации, его развитием во времени и распределением деформации на различных стадиях. Существенное влияние на процесс разделения оказывает технологический зазор.

Распределение деформации при сдвиге. На рис. 2 приведена обобщенная схема очага деформации (на стадии пластического сдвига) в момент, предшествующий возникновению скалывающих трещин и составляющих его зон в разделительных операциях листовой штамповки. Она установлена на основе замеров микротвердости в очаге деформации при исследовании процесса разделения тонколистовой стали на штампе с жестким съемником (без прижима) с различным технологическим зазором ($z = 5 \div 15$ %).

Краткая характеристика зон очага деформации:

зоны *I* шириной $b_м = b_п = (0{,}4 \div 0{,}6)\,s$ находятся под пояскими смятия, со стороны пуансона и матрицы, простираясь на небольшую глубину. В этой зоне материал заготовки наиболее интенсивно упрочняется в областях, примыкающих к режущим кромкам пуансона и матрицы;

зоны II охватывают режущие кромки как пуансона, так и матрицы, распространяясь вдоль торцовых и боковых поверхностей рабочих частей штампа и вглубь материала, который в этой зоне упрочняется наиболее интенсивно;

зона III находится между вторыми зонами со стороны матрицы и пуансона, сопрягаясь с основным материа-

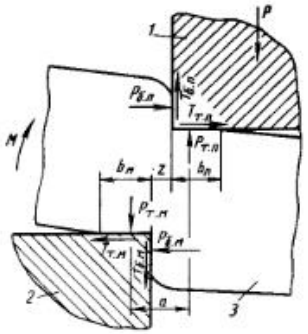


Рис. 1. Схема сил, действующих на пуансон и матрицу со стороны деформируемой заготовки на стадии пластического сдвига при вырубке—пробивке:
1 — пуансон; *2* — матрица; *3* — отделяемая часть заготовки

лом очага деформации. Упрочнение материала в этой зоне меньше, чем во второй;

зоны IV простираются от границ зон I, II и III до границ недеформируемой части заготовки. Упрочнение материала в зоне IV постепенно убывает по мере удаления от линии разделения в направлении, перпендикулярном к направлению сдвига.

Локализация очага деформации возрастает по мере уменьшения технологического зазора.

Интенсивность напряжений σ и деформаций ε в различных зонах очага

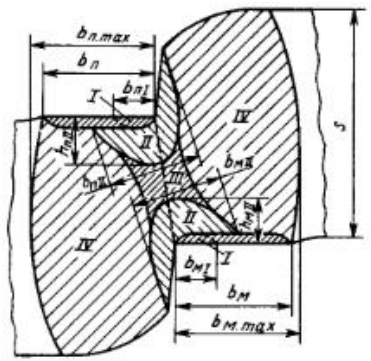


Рис. 2. Схема очага деформации и составляющих его зон в разделительных операциях листовой штамповки

деформации зависит от величины технологического зазора. При этом максимальные значения σ и ε имеют место вблизи вершин режущих кромок пуансона и матрицы, а также в областях II и III зон, находящихся в непосредственной близости от поверхности разделения.

Интенсивность деформации ε на границе очага деформации принята равной соответственно интенсивности деформации исходного металла заготовки — высоколегированной холоднокатаной электротехнической стали.

Связь между твердостью HV, интенсивностью напряжений σ и интенсивностью деформации ε установлена по методу, разработанному Г. Д. Делем.

В табл. 1 приведены данные Ф. П. Мнхаленко и А. И. Гуляева по распределению интенсивности деформации при вырубке деталей размером 8×16 мм из высоколегированной холоднокатаной изотропной электротехнической стали 2411. Интенсивность деформации определялась по градуировочному графику HV —ε, построенному по результатам испытания пластинчатых образцов на растяжение согласно ГОСТ 11701—66. Связь между макро- и микротвердостью установлена согласно методике, рекомендованной В. Д. Лисицыным.

Измерение микротвердости в очаге деформации на различных этапах процесса разделения производили на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамиду $P = 0{,}1$ Н с шагом между отпечатками, равным 30 мкм. В результате получали координатную сетку с отпечатками алмазной пирамиды в ее узлах, охватывающую весь очаг деформации.

Из табл. 1 видно, что интенсивность деформации ε с ростом технологического зазора изменяется неоднозначно в зонах I, II и III, вначале уменьшается при изменении z с 5 до 7,5 %, а затем существенно возрастает при изменении z от 7,5 до 15 %. При заданном технологическом зазоре наибольшая интенсивность деформации наблюдается в зонах II. Минимальное значение интенсивности деформации имеет место при оптимальном технологическом зазоре ($z = 7{,}5$ %). Распределение интенсивности деформации в характерных зонах очага деформации со стороны пуансона и матрицы одинаково. Это позволяет сделать предположение об одновременности возникновения скалывающих трещин со стороны пуансона и матрицы при вырубке и пробивке тонколистовой холоднокатаной электротехнической стали и других тонколистовых металлов.

Интенсивность напряжений σ и деформации ε в зоне II больше, чем в зоне I. Это объясняется тем, что на первой стадии процесса вырубки — пробивки (рис. 3, *а* и *б*) деформация материала под пуансоном и над матрицей сопровождается его перемещением по контактным пояскам пуансона и матрицы (см. рис. 3), которое прекращается в тот момент, когда интенсивность напряжений σ в области режущих кромок превышает предел текучести $\sigma_т$ штампуемого материала. Таким образом, по мере роста σ происходит постепенное увеличение сопротивления материала перемещению слоев заготовки по контактным пояскам, с образованием поясков смятия.

После образования поясков смятия перемещение материала заготовки по контактным пояскам пуансона и матрицы прекращается.

Образование зон I очага деформации и очертание его границ завершаются к моменту начала внедрения режущих кромок рабочих частей штампа в тело деформируемой заготовки (рис. 3, *в*), т. е. в момент завершения образования утяжки и стадии упругой деформации заготовки.

С момента внедрения режущих кромок пуансона и матрицы в тело заготовки (начало пластического сдвига) деформация локализуется в объеме металла, находящегося между режущими кромками пуансона и матрицы. При этом образуются зоны II и III очага деформации. Интенсивность напряжений и деформации в зоне III меньше, чем в зоне II, поэтому и металл там упрочняется в меньшей мере.

1. Распределение интенсивности деформации ε в различных зонах очага деформации при штамповке стали 2411 толщиной 0,5 мм

Односторонний зазор z, %	ε в зонах очага деформации (см. рис. 2)			
	I	II	III	IV
	Под пуансоном			
5	0,250—0,160	0,460—0,338	0,338—0,250	0,113—0,005
7,5	0,250—0,113	0,338—0,250	0,250—0,180	
10	0,338—0,250	0,460	0,338—0,250	
15	0,460—0,180	0,550—0,450	0,338	0,180—0,005
	Над матрицей			
5	0,258—0,113	0,460—0,338	0,335—0,250	0,113—0,005
7,5	0,250—0,113	0,338—0,250	0,250—0,180	
10	0,460—0,250	0,460	0,338—0,250	
15	0,460—0,180	0,550—0,450	0,338	0,180—0,005

Примечание. Механические свойства высоколегированной холоднокатаной электротехнической стали 2411: $\sigma_в = 430 \div 450$ МПа; $\delta_5 = 24 \div 25$ %; HV 1800—1820 МПа.

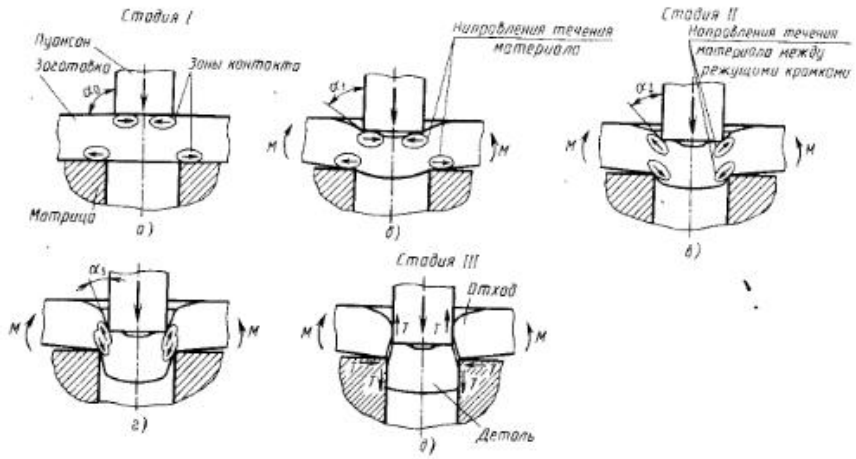


Рис. 3. Последовательные стадии изнашивания рабочих частей штампа с указанием перемещения обрабатываемого материала относительно поверхности рабочих частей штампа при вырубке—пробивке тонколистового материала ($s \leqslant 1{,}0$ мм):
I — торцовый износ; II — краевой износ; III — боковой износ

Вследствие локализации деформации между режущими кромками пуансона и матрицы на стадии пластического сдвига образующиеся поверхности блестящих поясков отделяемой части заготовки и отхода не взаимодействуют с боковыми рабочими поверхностями пуансона и матрицы (рис. 3, *г*) из-за недостаточной величины радиальных сил от изгиба заготовки.

При дальнейшем внедрении пуансона в тело заготовки (на стадии пластического сдвига) происходит распространение зон II вглубь заготовки, сопровождаемое уменьшением объема металла, охватываемого зоной III очага деформации.

Максимальная ширина зон от линии разделения, охватываемых очагом деформации в направлении, перпендикулярном перемещению пуансона, зависит от технологического зазора и составляет 55—65 % от s для $z = 5 \div 15$ %.

Стадия пластического сдвига заканчивается тогда, когда пластичность металла в зонах II очага деформации при заданных условиях деформирования полностью исчерпывается. После чего появляются скалывающие трещины у режущих кромок пуансона и матрицы (рис. 3, *д*).

С увеличением технологического зазора ($z = 5 \div 15$ %) растут все параметры отдельных зон очага деформации (см. рис. 2): ширина поясков смятия ($b_{\text{п}}$, $b_{\text{м}}$) увеличивается на 50 %; ширина участков зоны I с высоким значением σ и ε ($b_{\text{п I}}$, $b_{\text{м I}}$) — на 100 %; глубина распространения второй зоны ($h_{\text{п II}}$, $h_{\text{м II}}$) — на 58 %; максимальная ширина очага деформации ($b_{\text{п max}}$, $b_{\text{м max}}$) — на 21 %; ширина распространения зоны *II* ($b_{\text{п II}}$, $b_{\text{м II}}$) — на 85 %.

Геометрические параметры очага деформации в момент, предшествующий началу стадии разрушения $(h_{\text{в}}/s) \times 100 = 58 \div 60$ % при оптимальном технологическом зазоре ($z = 7{,}5$ %), характеризуются следующими данными в долях от толщины металла: $b_{\text{п I}} = b_{\text{м I}} = 0{,}18s$; $b_{\text{п}}$, $b_{\text{м}} = 0{,}5s$; $b_{\text{п max}}$, $b_{\text{м max}} = 0{,}58s$; $b_{\text{п II}}$, $b_{\text{м II}} = 0{,}39s$; $h_{\text{п II}}$, $h_{\text{м II}} = 0{,}20s$.

Влияние технологического зазора на формирование поверхности разделения. Направление касательной в точке перегиба предельной линии скольжения изменяется в зависимости от величины технологического зазора. Наиболее благоприятным является направление касательной, совпадающее с направлением смещения разделяемых частей заготовки, т. е. с направлением разделения (рис. 4). В этом случае получаются минимальные силовые и энергетические затраты в процессе разделения (пластического сдвига) при хорошем качестве поверхности разделения. Зазор, обеспечивающий эти условия при вырубке—пробивке, является оптимальным по стойкости штампового инструмента.

При малых зазорах указанная касательная не совпадает с направлением разделения и поднутрена под торец пуансона (рис. 4, *б*), что приводит к увеличению усилия и работы разделения. Трещины скалывания в этом случае, распространяясь от режущих кромок пуансона и матрицы, не встречаются, и образовавшаяся перемычка при дальнейшем нагружении инструмента разделяется дополнительным пластическим сдвигом, причем на поверхности разделения образуются два или несколько блестящих поясков, разделенных между собой зонами скола.

При разделении (сдвиге) с малым зазором твердых малопластичных металлов образование вторичных пластических сдвигов не наблюдается, срединные слои при этом хрупко разрушаются с образованием вырывов и неровностей на поверхности скола.

В случае увеличенного зазора трещины скалывания сливаются в срединных слоях листа, но вследствие увеличенных растягивающих напряжений выходят на свободные поверхности на значительном расстоянии от режущих кромок с образованием толстых рваных заусенцев.

Параметры, характеризующие геометрические несовершенства поверхности разделения ($h_{\text{у}}/s$, $h_{\text{п}}/s$, $h_{\text{с}}/s$, $x/h_{\text{с}}$) (см. рис. 8), в основном зависят от технологического зазора (табл. 2), а следовательно, и от интенсивности деформации в очаге деформации.

Из табл. 2 видно, что параметры геометрических несовершенств поверхности разделения при увеличении z от 5 до 15 % изменяются следующим образом: $h_{\text{у}}$ и $h_{\text{с}}$ возрастают соответственно на 70 и 69 %, а $h_{\text{п}}$ уменьшается на 78 %. Геометрические параметры поверхности разделения при одном и том же зазоре z на контурах разделяемых частей заготовки примерно одинаковы (см. табл. 2). Это является под-

2. Изменение геометрических параметров поверхности разделения вырубаемых деталей из стали 2411 толщиной 0,5 мм в зависимости от технологического зазора

Односторонний зазор z, %	Высота, мм		
	утяжки $h_{\text{у}}$	блестящего пояска $h_{\text{п}}$	скола $h_{\text{с}}$
		На деталях	
5	0,050	0,295	0,162
7,5	0,065	0,263	0,175
10	0,070	0,218	0,222
15	0,085	0,165	0,270
		На отходе	
5	0,048	0,295	0,165
7,5	0,063	0,260	0,180
10	0,070	0,220	0,218
15	0,085	0,070	0,260

Примечание. В таблице приведены средние значения измеряемых параметров из десяти измерений.

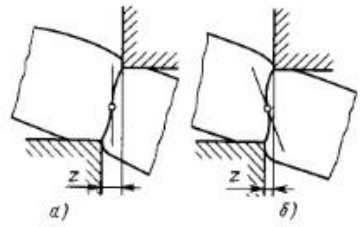


Рис. 4. Направление касательной в точке перегиба предельной линии скольжения:
а — при оптимальном зазоре z; *б* — при уменьшенном зазоре z

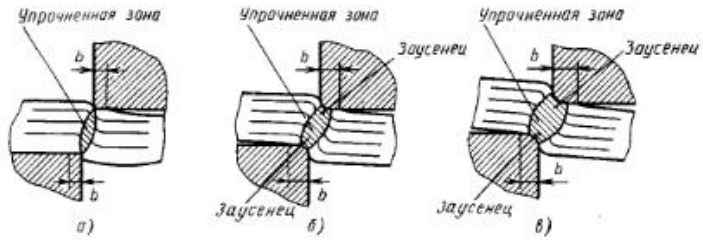


Рис. 5. Схема образования упрочненной зоны и заусенца при вырубке—пробивке инструментом с острыми режущими кромками (*а*) и притупленными (*б* и *в*) кромками

твержденнем того, что напряженно-деформированное состояние материала заготовки в зоне режущих кромок пуансона и матрицы при вырубке тонколистового металла примерно одинаково.

При наличии отрицательного зазора между поверхностями сдвига объем заключенной между ними области должен сокращаться (выдавливаться), и, если возможность смещений разделяемых частей в направлении по нормали от плоскости сдвига исключена, в этой области и ее окрестности возникает отрицательное давление

$$(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3.$$

Это давление способствует увеличению пластичности материала в зоне у режущих кромок, и, если оно достаточно велико (по модулю) разрушение не возникает, поверхность физического разделения является и поверхностью геометрического разделения. Она не имеет признаков разрушения металла в приповерхностном слое. Углы ее пересечения с поверхностью материала практически не имеют искажений.

При наличии достаточного прижима материала к рабочим поверхностям инструмента создаются более благоприятные условия для пластического сдвига, что приводит к повышению качества получаемых деталей за счет уменьшения коэффициентов, характеризующих геометрические несовершенства поверхности разделения.

Вырубка, пробивка. Величина *технологического зазора* в разделительных операциях листовой штамповки оказывает существенное влияние на качество получаемых деталей, на силовые и энергетичеекие затраты процесса разделения, а следовательно, и на стойкость штампов.

В результате неправильно выбранного зазора происходит интенсивное затупление режущих кромок пуансона и матрицы в процессе эксплуатации штампа, вследствие чего на вырубаемых деталях и пробиваемых отверстиях образуются заусенцы (рис. 5), а на поверхности разделения различного рода дефекты.

Острозаточенные режущие кромки (рис. 5, *а*) и оптимальный зазор между ними создают наиболее благоприятные условия для процесса разделения деформируемого материала. При вырубке—пробивке инструментом с притупленными режущими кромками (рис. 5, *б*) очаг пластической деформации расширяется, что приводит к повышению сопротивления сдвигу $\sigma_{сд}$. Образующийся при вырубке—пробивке заусенец является частью упрочненной зоны (см. рис. 5, *б* и *в*) и поэтому, взаимодействуя с рабочими поверхностями матрицы и пуансона, интенсифицирует их изнашивание.

Экспериментальные данные, полученные в исследованиях по вырубке—пробивке различного рода металлов, свидетельствует о том, что при определении оптимального технологического зазора необходимо различать первый и второй оптимальные зазоры: первый оптимальный зазор обеспечивает получение высококачественных деталей при высоких силовых и энергетических затратах на разделение штампуемого материала. При этом стойкость штампов будет пониженной. Второй оптимальный зазор обеспечивает получение деталей хорошего качества при минимальных или умеренных силовых и энергетических затратах на деформацию материала, а следовательно, и максимальной стойкости штампового инструмента.

Оптимальный односторонний технологический зазор в разделительных операциях листовой штамповки для тонколистовых металлов определяют по эмпирической формуле

$$z_o = 0{,}32 K K_v s \sqrt{\sigma_{сд}},$$

где z_o — односторонний зазор; K — коэффициент, определяющий вид оптимального зазора (первый или второй оптимальный зазор); K_v — коэффициент, учитывающий влияние скорости деформирования $v_д$; s — толщина металла, мм; $\sigma_{сд}$ — сопротивление разделению (сдвигу), МПа.

Для получения высококачественных деталей из тонколистовых металлов при определении первого оптимального зазора (z'_o) следует принять $K = 0{,}005$. При определении второго оптимального зазора (z''_o) для получения минимальных силовых и энергетических затрат, а следовательно, и деталей хорошего качества коэффициент K различен для каждого материала. Так, например, для бронзы Бр.ОФ6,5-0,15-От $K = 0{,}09$, для меди М3 $K = 0{,}015$, а для латуни Л63М $K = 0{,}022$.

Значение коэффициента K_v зависит от скорости деформирования: при $v_д \leqslant 10$ см/с для различных материалов $K_v = 1{,}0$; при $v_д \leqslant 10$—30 см/с для разных материалов коэффициент K_v различен. Например, для бронзы Бр.ОФ6,5-0,15-От ($s = 0{,}6$ мм) $K_v = 1{,}22$, для меди М3 ($s = 1{,}85$ мм) $K_v = 1{,}02$, а для латуни Л63М ($s = 1{,}5$ мм) $K_v = 1{,}07$.

При оптимальном одностороннем технологическом зазоре $z_o = 7{,}5\ \%$ В. П. Романовский рекомендует определять сопротивление сдвигу по формуле

$$\sigma_{сд} = (1{,}2s/d + 0{,}6)\,\sigma_в \approx (1 + 2s/d)\,\sigma_т,$$

где $\sigma_в$ — временное сопротивление; $\sigma_т$ — предел текучести при растяжении.

В табл. 3 приведены рекомендуемые значения первого и второго оптимальных зазоров при вырубке—пробивке ряда черных и цветных металлов, применявшихся в экспериментах.

3. Рекомендуемые значения первого и второго оптимальных односторонних технологических зазоров

Материал	Оптимальный зазор, % от s	
	z'_o	z''_o
Сталь:		
08	1,5—2,5	7,5—8,5
10кп	1,0—1,5	8,5—10
35	1,0—1,5	8,5—10
12Х18Н10Т	1,0—1,5	10—11
65Г	3,5—4,0	10—12
У8А (термообработанная)	2,0—3,0	6,5—8,5
1211	2,0—3,0	6,5—8,5
1212	2,0—3,0	6,5—8,5
1213	2,0—3,0	6,5—8,5
2011	1,5—2,5	5,0—9,0
2013	1,5—2,5	5,0—9,0
2111	1,5—2,5	5,0—9,0
2211	1,5—2,5	5,0—9,0
2411	1,5—2,5	7,0—8,0
3411	1,5—2,5	6,0—8,0
Латунь:		
Л63М	1,5—2,0	7,0—8,0
Л63-От	2,0—2,5	4,0—5,0
Медь М3	1,5—2,0	4,0—4,5
Бронза. Бр.ОЦ4-3-ПТ	2,0—2,5	4,0—5,0
Дуралюмин:		
Д16АМ	1,5—2,0	5,0—6,0
Д16АТ	2,0—2,5	4,5—5,5

Основные правила образования зазоров:

1) при вырубке наружного контура зазор образуется за счет уменьшения размеров пуансона. Размер матрицы принимают равным наименьшему предельному размеру детали;

2) при пробивке отверстий зазор образуется за счет увеличения размеров матрицы. Размер пуансона принимают равным наибольшему предельному размеру отверстия.

При штамповке материалов из фольги (толщиной менее 0,2 мм) применяют практически беззазорные штампы с со-

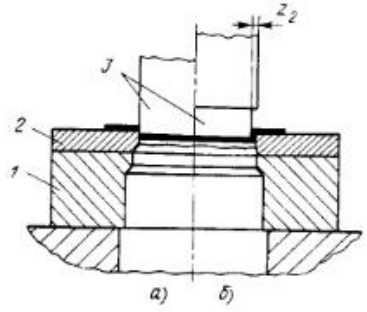


Рис. 6. Схема рабочих частей штампа:
а — для беззазорной вырубки—пробивки;
б — для вырубки—пробивки с зазором z_2

пряжением рабочих частей без механической обработки.

На рис. 6 схематично показаны рабочие части штампа: вспомогательная матрица *1*, рабочая матрица *2* и пуансон *3*.

Для изготовления штампа (рис. 7) выполняют вспомогательную матрицу *1* и пуансон *3*. Размеры рабочего отверстия вспомогательной матрицы *1* выполняют по размерам пуансона *3* с зазором z_1, необходимым для пробивки рабочего отверстия в заготовке рабочей матрицы *2* с учетом ее толщины H и рода материала. Термическая обработка вспомогательной матрицы *1* необязательна, так как режущие кромки ее работают лишь при изготовлении рабочей матрицы *2*. Вспомогательную матрицу *1* и пуансон *3* спаривают обычными способами и закрепляют в блоке штампа.

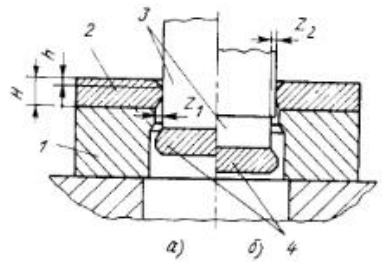


Рис. 7. Схема изготовления рабочих частей штампа:
а — для беззазорной вырубки—пробивки;
б — для вырубки—пробивки с зазором z_2

Наибольшая толщина заготовки рабочей матрицы *2* при использовании вспомогательной матрицы *1* без термической обработки не более 3—5 мм.

Заготовку рабочей матрицы фиксируют и закрепляют на зеркале вспомогательной матрицы *1*. Затем собирают штамп с его верхней частью и пробивают рабочее отверстие в заготовке рабочей матрицы *2* пуансоном *3* с удалением отхода *4*.

После пробивки штамп вскрывают и без разборки нижней части, посредством плоского шлифования, снимают слой толщиной h с плоскости рабочей матрицы *2* до удаления закругления (утяжки) на кромках рабочих отверстий.

Вновь собранный с верхней частью штамп готов к работе (см. рис. 6). В случае необходимости заготовку рабочей матрицы *2* демонтируют и термически обрабатывают с целью повышения стойкости штампа.

Если требуется рабочую матрицу *2* изготовить с зазором на резание z_2, то пуансон *3* следует выполнить ступенчатым (рис. 6, *б* и 7, *б*) и при пробивке отверстий в заготовке рабочей матрицы *2* заглублять его соответственно больше (рис.7, *б*).

При ремонте штампа после выработки ресурса рабочей матрицы *2* замене подлежит лишь рабочая матрица.

Положительные результаты получены при стойкостных испытаниях таких штампов при штамповке танталовой фольги со следующими вариантами материалов матриц и пуансонов: матрица из алюминиево-железной бронзы БрАЖ 9-4, пуансон из твердого сплава ВК20; матрица из стали Х12М, пуансон из твердого сплава ВК20. В первом случае стойкость штампа составила 19,3 тыс. нагружений, во втором случае — 43,5 тыс. нагружений.

Для производства деталей небольших серий рекомендуется использовать штампы с матрицами из бронзы БрАЖ-9-4, рабочие окна которых получают пробивкой рабочими пуансонами.

При серийном производстве деталей следует использовать штампы с матрицами из стали Х12М (твердостью *HRC* 57—60), рабочие окна которых пробивают до термообработки. В качестве материала пуансона рекомендуется твердый сплав ВК20.

Качество поверхности разделения оценивается показателями ее геометрических несовершенств и показателями микрогеометрии. Геометрические несовершенства оценивают следующими коэффициентами: утяжки $k_y = h_y/s$; блестящего пояска $k_п = h_п/s$; скола $k_c = h_c/s$; непрямолинейности $k_x = x/s$ и величиной $k_\alpha = \operatorname{tg}\alpha = x/h_c$, а также высотой $h_з$ заусенца (рис. 8).

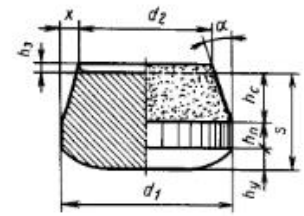


Рис. 8. Характер поверхности разделения вырубленной детали и ее геометрические параметры

Наиболее благоприятный профиль поверхности разделения, а следовательно, и более высокое качество деталей характеризуется сравнительно большим коэффициентом $k_п$ и сравнительно малыми коэффициентами k_y, k_c, k_x и k_α.

Универсальный прибор, позволяющий последовательно измерять все геометрические параметры профиля поверхности разделения, приведен в работе [45].

Характер поверхности разделения деталей можно классифицировать по классам геометрических несовершенств дифференцированно для пластичных и малопластичных материалов, исходя из принципа объединения коэффициентов k_y, $k_п$, k_x и k_α по их числовым значениям.

Применительно к мягким (пластичным цветным металлам Л63М, М3, Д16АМ и др.) дается следующая характеристика классов геометрических несовершенств поверхности разделения (табл. 4).

Класс I характеризуется минимальным коэффициентом утяжки ($k_y \leqslant \leqslant 0{,}14$), весьма высоким значением коэффициента блестящего пояска $k_п$, наличием вторичного блестящего пояска и отсутствием заусенцев. Получение деталей этого класса геометрических несовершенств сопровождается большими силовыми и энергетическими затратами на разделение деформируемого металла.

Класс II характеризуется сравнительно небольшим значением k_y, большой величиной коэффициента $k_п$, сравнительно малыми величинами k_x и k_α и наличием следов вторичного среза. Качество деталей высокое, так как профиль разделения на участке скола мало отклоняется от вертикали к поверхности детали, а заусенец отсутствует.

Класс III, наиболее распространенный в металлообработке, характеризуется повышенным значением k_y, высоким значением $k_п$, средними значениями коэффициентов k_x и k_α и отсутствием заусенцев при острозаточенных режущих кромках. Получение деталей, соответствующих этому классу происходит при невысоких силовых и энергетических затратах на разделение штампуемого металла.

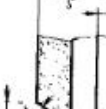
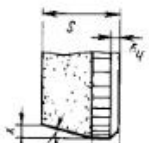
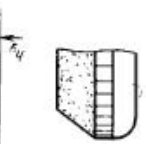
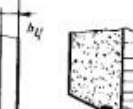
Класс IV характеризуется высоким значением коэффициента k_y при наличии сравнительно большой высоты блестящего пояска $h_п$, а также сравнительно высокими значениями k_x и k_α. Детали этого класса удовлетворительного качества.

Класс V характеризуется очень большим значением k_y, высокими значениями k_x и k_α при среднем значении $k_п$. Этот класс геометрических несовершенств поверхности разделения рекомендуется при пробивке отверстий.

Сравнение данных, приведенных в табл. 4, показывает, что не может быть единой классификации поверхности разделения по классам геометрических несовершенств для мягких (пластичных) и твердых (малопластичных) металлов, так как численные значения коэффициентов k_y, $k_п$ и k_α для твердых металлов в несколько раз меньше, чем для мягких.

Получение деталей, соответствующих любому из пяти классов геометрических несовершенств поверхности разделения, обеспечивается вполне определенным диапазоном размеров технологического зазора (рис. 9).

4. Значения коэффициентов геометрических несовершенств поверхности разделения деталей, вырубаемых из цветных металлов

Тип профиля	Профиль разделения для металла		$k_у$	$k_п$	k_z	$k_α$
	пластичного	малопластичного				
I			До 0,14 / До 0,05	От 0,65 * / От 0,11	До 0,01 / До 0,02	До 0,05 / До 0,02
II			0,14—0,18 / 0,05—0,065	0,65—0,55 / 0,11—0,08	0,01—0,04 / 0,02—0,04	0,05—0,15 / 0,02—0,05
III			0,18—0,23 / 0,065—0,08	0,55—0,5 / 0,08—0,065	0,04—0,07 / 0,04—0,065	0,15—0,25 / 0,05—0,075
IV			0,23—0,27 / 0,08—0,12	0,5—0,35 / 0,065—0,06	0,07—0,10 / 0,065—0,08	0,025—0,03 / 0,075—0,11
V			0,27—0,33 / 0,12—0,19	0,35—0,25 / 0,06—0,55	0,10—0,14 / 0,08—0,14	0,3—0,4 / 0,11—0,19

* Зону вторичного среза при замере высоты блестящего пояска не учитывали.

Примечание: В числителе приведены значения коэффициентов для пластичного металла, в знаменателе — для малопластичного.

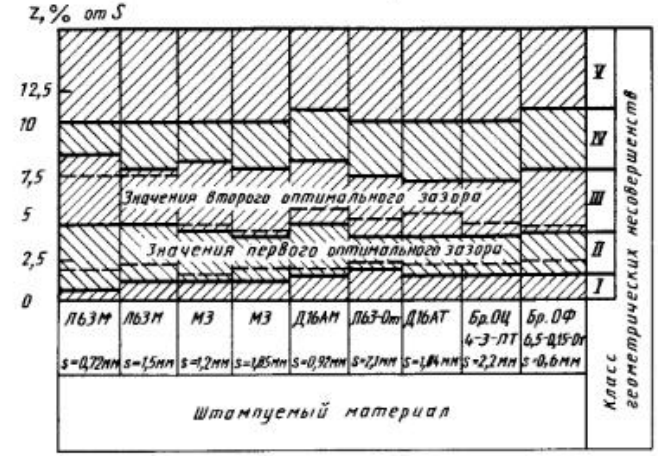


Рис. 9. Диаграмма технологических зазоров для цветных металлов и различных классов геометрических несовершенств поверхности разделения

Классификация поверхности разделения по классам геометрических несовершенств деталей, вырубленных из низкоуглеродистой стали (10кп, сталь 35), а также из коррозионностойкой стали 12Х18Н9Т, приведена в работе [45].

Имея классификацию поверхности разделения по классам геометрических несовершенств, можно при разработке технологического процесса штамповки, исходя из требований, предъявляемых к деталям данного вида производства, рационально решить вопрос о том, к какому классу геометрических несовершенств поверхности разделения следует отнести ту или иную деталь. Это в известной мере предопределяет себестоимость изготовления штамповой оснастки, а следовательно, и себестоимость изготовления деталей.

Основной составной частью поверхности разделения (сдвига), определяющей ее качество, является высота $h_п$, блестящего пояска поскольку эта поверхность участвует в сопряжении с другими деталями и контролируется по размерам. Величина $h_п$ зависит от пластичности металла, толщины заготовки, технологического зазора и скорости деформирования (число ходов пресса).

На рис. 10, *а* приведены усредненные значения зависимости $h_п/s$ от

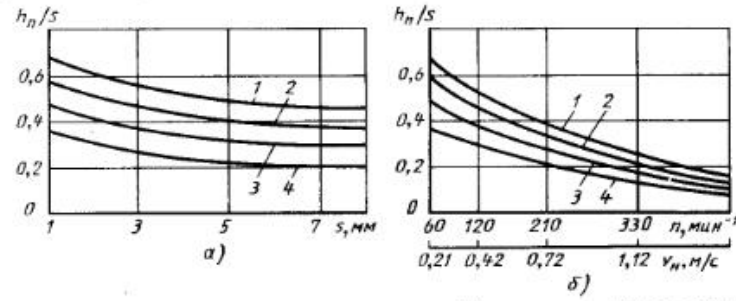


Рис. 10. Зависимость $h_п/s$ от толщины материала (*а*) и частоты ходов пресса (*б*):
1 — для стали 08кп ($\sigma_в$ = 300 МПа); *2* — для стали 20кп ($\sigma_в$ = 400 МПа); *3* — для стали 30 ($\sigma_в$ = 500 МПа); *4* — для стали 50 ($\sigma_в$ = 650 МПа)

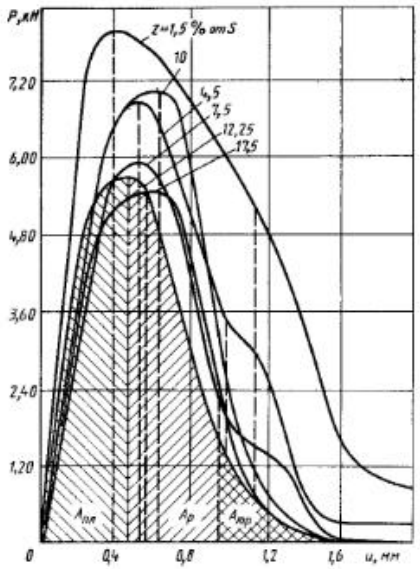


Рис. 11. Изменение усилий вырубки—пробивки стали 08 с $s = 2$ мм в зависимости от глубины внедрения $h_в$ пуансона при различном технологическом зазоре z ($n = 275$ мин$^{-1}$)

толщины металла для различных марок сталей, полученные при вырубке с малой скоростью деформирования при нормальных зазорах между пуансоном и матрицей. При вырубке на быстроходных прессах с частотой ходов 400—600 мин$^{-1}$ относительная высота пластической зоны поверхности разделения (сдвига) уменьшается от трех до пяти раз.

На рис. 10, *б* показана зависимость $h_п/s = f(n)$ (n — число ходов пресса в минуту) для материала толщиной 1—1,2 мм с различными механическими свойствами. Диапазон начальных скоростей деформирования $v_н = 0{,}21 \div 1{,}48$ м/с.

В результате совместного решения указанных зависимостей В. П. Романовским получены следующие уравнения:

для стали 08кп ($\sigma_в = 300$ МПа)

$$h_п/s = 0{,}76 - 0{,}035s - 0{,}0014n;$$

для стали 20кп ($\sigma_в = 400$ МПа)

$$h_п/s = 0{,}67 - 0{,}04s - 0{,}0012n;$$

для стали 30 ($\sigma_в = 500$ МПа)

$$h_п/s = 0{,}54 - 0{,}032s - 0{,}001n,$$

где $n = 60 \div 450$ мин$^{-1}$.

По данным В. Д. Лисициана, при вырубке деталей из тонколистовой стали с частотой ходов пресса 60 мин$^{-1}$ глубина внедрения пуансона до момента образования скалывающих трещин составляет 64 % от s. При этом пластическая стадия процесса вырубки сильно развита, а наклепанная зона довольно значительна. При быстроходной штамповке с частотой ходов пресса 450 мин$^{-1}$ пластическая стадия и глубина внедрения пуансона снижаются до 14 %, наибольшее развитие получает третья стадия процесса — скалывание. Большая часть поверхности представляет собой ровный скол, глубина наклепанного слоя невелика.

Сопротивление сдвигу. На рис. 11 приведены силовые графики вырубки—пробивки для стали 08 с различным технологическим зазором z. Наивысшие точки кривых отвечают наибольшему усилию P и окончанию пластической стадии процесса разделения. Перегиб кривых соответствует моменту возникновения скалывающих трещин у режущих кромок, что является началом скола. Резкое падение усилия соответствует окончанию процесса вырубки—пробивки. Остальная часть диаграммы фиксирует проталкивание отделяемой части заготовки через матрицу.

Сопротивление сдвигу зависит не только от механических свойств металла и степени предварительного наклепа, но также от относительной толщины вырубки, технологического зазора и скорости деформирования.

В. П. Романовским применительно к вырубке—пробивке круглых деталей и отверстий в заготовках из листовой стали различных толщин и марок установлена зависимость

$$\sigma_{сд} = (ms/d + 0{,}6)\,\sigma_в,$$

где m — коэффициент, зависящий от относительного зазора z/s.

При оптимальном одностороннем технологическом зазоре $z = 0{,}075s$ коэффициент $m = 1{,}2$.

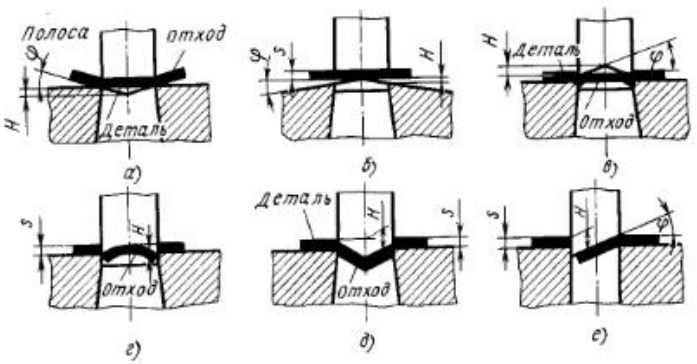


Рис. 12. Различные типы скоса режущих кромок:
H — глубина скоса режущих кромок; φ — угол скоса

Для случаев вырубки деталей крупных ($d \geqslant 1000\,s$), средних ($d \geqslant 50\,s$) и мелких [$d = (5 \div 10)\,s$] размеров при оптимальном зазоре вследствие малой жесткости влияние их относительной толщины на $\sigma_{сд}$ невелико. Поэтому в указанных случаях рекомендуется пользоваться приближенной зависимостью $\sigma_{сд} = (0{,}7 \div 0{,}8)\,\sigma_в$.

Усилие сдвига зависит от угла пересечения режущих кромок пуансона и матрицы (ножей). При угле пересечения, равном нулю (параллельные кромки),

$$P = Ls\sigma_{сд}; \qquad (1)$$

при пересечении кромок под углом φ

$$P = \sigma_{сд}s^2/2\ \mathrm{tg}\ \varphi, \qquad (2)$$

где L — длина контура разделения.

Для уменьшения усилия сдвига применяют инструмент с непараллельными режущими кромками (рис. 12).

Для вырубки деталей пуансон изготовляют плоским, а наклон кромки делают на матрице (рис. 12, *а*, *б*), обычно двусторонним и симметричным относительно плоскости симметрии контура разделения.

Для пробивки отверстий матрицу изготовляют плоской с горизонтальной режущей кромкой, а наклонную кромку выполняют на пуансоне (рис. 12, *в*—*д*).

При надрезке с отгибкой применяют односторонний наклон режущих кромок (рис. 12, *е*).

Рекомендуемые подъем наклонной режущей кромки и угол наклона приведены в табл. 5.

Усилие сдвига можно также найти по ориентировочной формуле

$$P = Ls\sigma_{сд}k, \qquad (3)$$

где k — коэффициент. Для L до 200 мм при $H = s$ $k = 0{,}4 \div 0{,}6$; при $H = 2s$, $k = 0{,}2 \div 0{,}4$.

Для случая вырубки с двусторонним наклоном режущих кромок (рис. 12, *а*—*в*) при $H = s$

$$P = 0{,}66\pi ds\sigma_{сд}, \qquad (4)$$

где d — диаметр контура разделения.

Формула М. Е. Зубцова для определения усилия вырубки для любого момента резки при цилиндрическом пуансоне (радиусом R) с наклоном режущих

5. Рекомендуемые подъем H наклонной режущей кромки и угол φ ее наклона

Толщина материала, мм	H, мм	φ, °	Снижение усилия P, %
До 3	$2s$	До 5	60—70
3—10	s	» 8	35—40

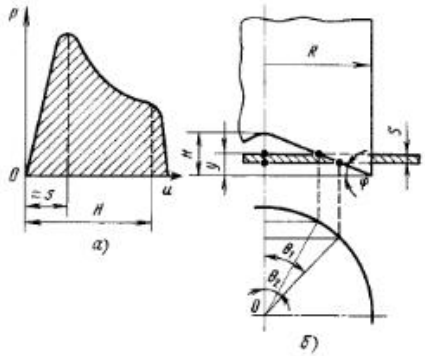


Рис. 13. Вырубка круглой детали пуансоном с наклоном режущих кромок внутрь: *а* — кривая усилия вырубки; *б* — схема к расчету усилия (по оси абсцисс — ход пуансона u; по оси ординат — усилие P)

кромок внутрь (рис. 13) имеет следующий вид:

$$P = 4m_0L_0s\sigma_{сд} = 4m_0R(\theta_1 - \theta_2)s\sigma_{сд} = 4m_0R\left[\arcsin\frac{H-y+s}{H} - \arcsin\frac{H-y}{H}\right]s\sigma_{сд} = L_{пр}s\sigma_{сд}, \quad (5)$$

где H — высота подъема режущих кромок; y — переменный параметр, зависящий от глубины внедрения пуансона; m_0 — коэффициент; для материалов толщиной s до 2 мм $m_0 = 0{,}60 \div 0{,}55$, а для $s = 2 \div 4$ мм $m_0 = 0{,}55 \div 0{,}5$; $L_{пр}$ — приведенный периметр резки.

Максимальное усилие вырубки при резке таким пуансоном получается при $y \approx s$ в начале резки (рис. 13, *а*). При $R = 30$ мм и угле наклона $\varphi = 4 \div 6°$ для материалов $s = 0{,}5 \div 3{,}5$ мм оно составляет 40—55 % усилия вырубки плоским пуансоном.

Формула (5) справедлива лишь при условии, что $H \geqslant h \approx s$ (h — глубина внедрения пуансона в металл в момент его разделения).

Обычно режущие кромки располагаются под углом φ друг к другу только на части контура разделения.

Работу сдвига при использовании инструмента с параллельными режущими кромками определяют по формуле

$$A = \lambda P s, \quad (6)$$

где P — усилие сдвига; λ — коэффициент, зависящий от рода и толщины штампуемого материала (табл. 6).

Экспериментально установлено, что с увеличением технологического зазора z при вырубке—пробивке стали 08 работа A уменьшается с затухающей интенсивностью. При изменении зазора от 3 до 15 % от s значение A уменьшается примерно в 2 раза. Аналогичные данные получены при вырубке—пробивке латуни. Увеличение зазора до величин, соответствующих минимальным значениям общей работы разделения, сопровождается интенсивным снижением последней. Например, при $n = 275$ мин$^{-1}$ для Л63М ($s = 1{,}5$ мм) работа разделения снижается на 50,5 %, для латуни Л63-От ($s = 2{,}1$ мм) — на 57,5 %. При почти трехкратном повышении быстроходности пресса ($n = 139 \div 423$ мин$^{-1}$) общая работа разделения уменьшается на 16,3 % для Л63М ($s = 0{,}72$ мм) при $z = 21$ %, на 6,6 % для Л63М ($s = 1{,}5$ мм) при $z = 15{,}5$ % и на 5,4 % для Л63-От ($s = 2{,}1$ мм) при $z = 9{,}5$ %.

6. Значения коэффициента λ

Материал	Толщина материала, мм			
	До 1	1—2	2—4	Св. 4
Сталь мягкая ($\sigma_{сд} = 250 \div 350$ МПа)	0,70—0,65	0,65—0,60	0,60—0,50	0,45—0,30
Сталь средней твердости ($\sigma_{сд} = 350 \div 500$ МПа)	0,60—0,55	0,55—0,50	0,50—0,42	0,40—0,30
Твердая сталь ($\sigma_{сд} = 500 \div 700$ МПа)	0,45—0,40	0,40—0,35	0,35—0,30	0,30—0,15
Алюминий, медь	0,75—0,70	0,70—0,65	0,65—0,55	0,50—0,40

По мере притупления режущих кромок усилие и работа сдвига возрастают, что необходимо учитывать при подборе оборудования. При вырубке—пробивке латуни Л63М ($s = 1{,}5$ мм) к моменту переточки штампа (вырублено 140 тыс. деталей) это увеличение составляет соответственно 35 и 80 %, а стали 08 ($s = 2$ мм) (вырублено 100 тыс. деталей) увеличение 15 и 39 %.

Резка листового металла на ножницах. На рис. 14 приведена схема действующих сил при разрезке листа ножницами. Из схемы видно, что силы P_1 образуют пару сил с моментом $M = P_1a$, где a — плечо между точками приложения равнодействующих сил P_1, равное примерно $(1{,}5 \div 2)z$.

Под действием изгибающего момента материал разрезаемого листа стремится повернуться, занять наклонное положение и заклиниться между ножами, вследствие этого возникает боковое распирающее усилие T, величина которого при разрезке с прижимом Q составляет

$$T = (0{,}1 \div 0{,}2)P,$$

где P — усилие сдвига.

Резка листовых материалов производится на рычажных, гильотинных, дисковых и вибрационных ножницах (табл. 7). По характеру движения режущих кромок различают ножницы с поступательным и вращательным движением режущих кромок.

Для уменьшения изгиба полосы, а также во избежание выскальзывания листа из-под ножей во время разрезки угол φ должен быть меньше 9°. На практике угол наклона φ и число ходов n ножниц в зависимости от толщины s листа назначают в следующих пределах:

S, мм	φ, °	n, мин$^{-1}$
1—10	2—4	75—35
10—42	4—6	35—10

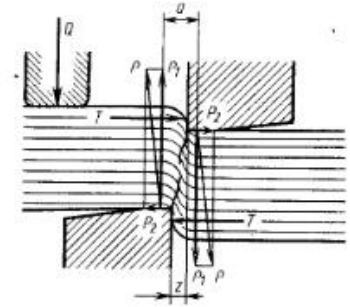


Рис. 14. Схема разрезки листа на ножницах

Зазор между ножами выбирают в пределах $z = (0{,}03 \div 0{,}06)s$.

Усилие разрезки ножницами с наклонными ножами во много раз меньше усилия, потребного для разрезки того же материала на ножницах с параллельными ножами. Работа, затрачиваемая на разрезку листа, в обоих случаях одинакова.

При выборе ножниц и прессов расчетное усилие резки рекомендуется определять по следующей формуле:

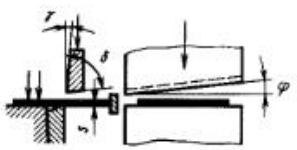
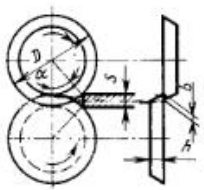
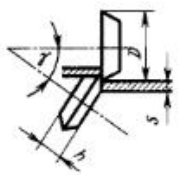
$$P_р = kP, \quad (7)$$

где $k = 1{,}2 \div 1{,}3$ — поправочный коэффициент, учитывающий влияние затупления ножей (режущих кромок), изменение величины зазора между ножами, равномерность толщины разрезаемого листа.

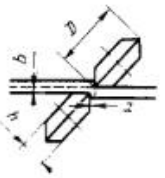
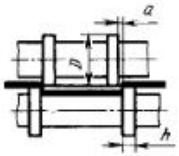
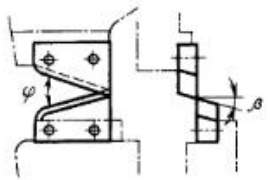
Зачистка. Детали, вырубленные штампами, из-за специфического характера поверхности разделения (наличие зоны скола, утяжка кромок со стороны матрицы, разница в размерах со стороны матрицы и пуансона) не могут быть применены для сборки в узлы с сопряжением по поверхности разделения (среза).

Наиболее экономичным методом чистовой обработки контура толстолистовых штампуемых деталей в серийном и массовом производстве является обработка зачистными штампами (рис. 15). Зачистные штампы целесообразно применять в следующих случаях: 1) когда к поверхностям штампованных деталей машин, механизмов и приборов предъявляются повышенные

7. Типы ножниц и их применение

Тип ножниц и схема	Рабочие элементы режущих инструментов	Применение
Гильотинные и рычажные 	Угол створа: для гильотинных ножниц $\varphi = 2 \div 6°$; для рычажных ножниц $\varphi = 7 \div 12°$ Угол резания $\delta = 75 \div 85°$ Задний угол $\gamma = 2 \div 3°$ Для упрощения заточки ножей допускается $\delta = 90°$ и $\gamma = 0$ Зазор между ножами от 0,05 до 0,2 мм	Резка листовых материалов на полосы или штучные заготовки. Толщина разрезаемого материала до 40 мм (в зависимости от типа ножниц)
Дисковые (с параллельными осями) 	Угол захвата $\alpha < 14°$ Заход ножей $b = (0{,}2 \div 0{,}3)\,s$ Размер ножей (дисков): для толстых материалов ($s > 10$ мм) $D = (25 \div 30)\,s$, $h = 50 \div 90$ мм; для тонких материалов ($s < 3$ мм) $D = (35 \div 50)\,s$, $h = 20 \div 25$ мм	Резка листов на полосы, а также резка круглых (дисковых) заготовок с выходом на край листа. Толщина разрезаемого материала до 30 мм (разрезные типы ножниц)
Дисковые (с наклонным нижним ножом) 	Угол наклона $\gamma = 30 \div 40°$ Размеры ножей (дисков): для толстых материалов ($s > 10$ мм) $D = 20s$, $h = 50 \div 80$ мм; для тонких материалов ($s < 3$ мм) $D = 28s$, $h = 15 \div 20$ мм	Резка полос, круглых дисковых и кольцевых заготовок. Толщина разрезаемого материала до 30 мм (разные типы ножниц)

Продолжение табл. 7

Тип ножниц и схема	Рабочие элементы режущих инструментов	Применение
Дисковые (с наклонными ножами) 	Зазор $a \leqslant 0{,}2s$ Зазор $b \leqslant 0{,}3s$ Размер ножей (дисков): для толстых материалов ($s > 10$ мм) $D = 12s$, $h = 40 \div 60$ мм; для тонких материалов ($s < 5$ мм) $D = 20s$, $h = 10 \div 15$ мм	Резка круглых, дисковых кольцевых и криволинейных заготовок с малым радиусом, толщиной до 20 мм. Криволинейная поверхность задней режущей грани обеспечивает свободный поворот материала
Многодисковые (с параллельными осями) 	Угол резания 90° Размеры ножей: $D = (40 \div 125)\,s$, $h = 15 \div 30$ мм Перекрытие: $b = \pm 0{,}5s$; зазор $a = (0{,}1 \div 0{,}2)\,s$	Одновременная резка нескольких полос, а также обрезка полос и лент по ширине. Толщина материала до 10 мм (разные типы ножниц)
Вибрационные 	Частота ходов 2 000—25 000 $мин^{-1}$ Ход ножа 2—3 мм Передний угол $\beta = 6 \div 7°$ Угол створа $\varphi = 24 \div 30°$	Резка криволинейных заготовок по разметке или шаблонам с малым радиусом (до $r = 15$ мм). Толщина материала до 10 мм

требования по шероховатости ($Ra = 2{,}5 \div 0{,}16$ мкм); 2) когда контур детали является базой для дальнейшего выполнения ряда операций с высокой точностью; 3) когда контур детали или его элемент представляют собой ответственную часть механизма.

Изготовление деталей с применением зачистных штампов обеспечивает выпуск взаимозаменяемых деталей в сложных и ответственных приборах, механизмах и машинах, повышает их износостойкость и коррозионную стойкость. Посредством зачистной штамповки получают детали небольших размеров с точностью, соответствующей 8—11 квалитету.

Зачистка срезанием припуска. Основным способом зачистной штамповки является зачистка наружного контура или отверстия посредством срезания предусмотренного припуска (производство часов и других изделий точной механики с весьма сложной

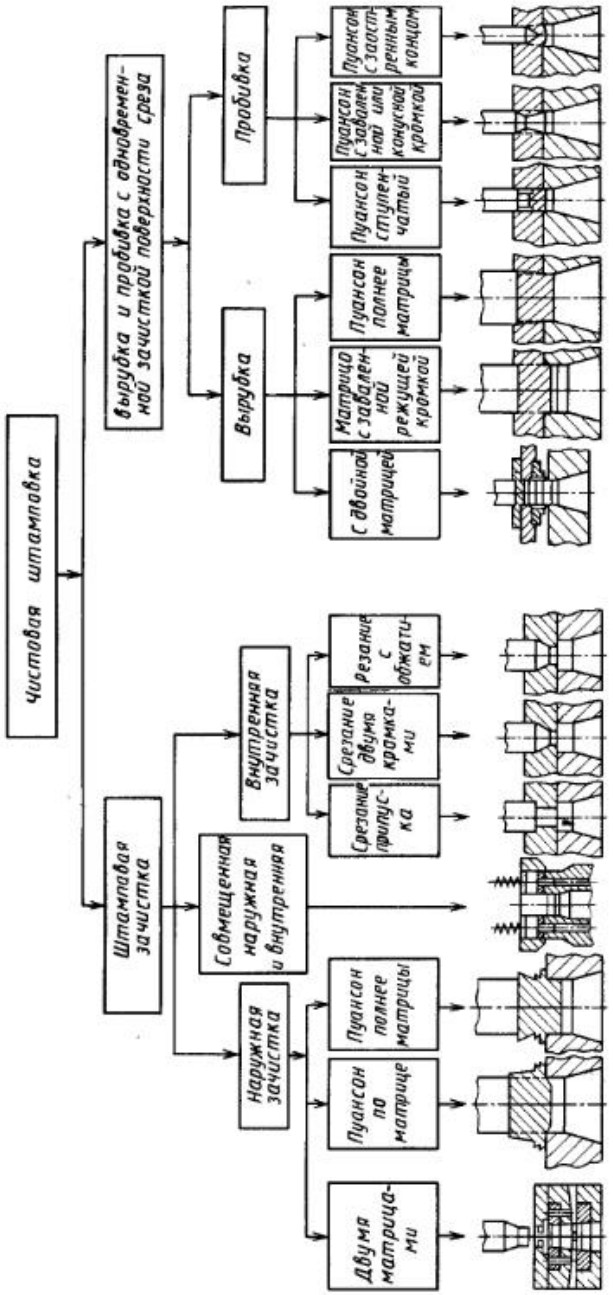


Рис. 15. Классификатор зачистных операций

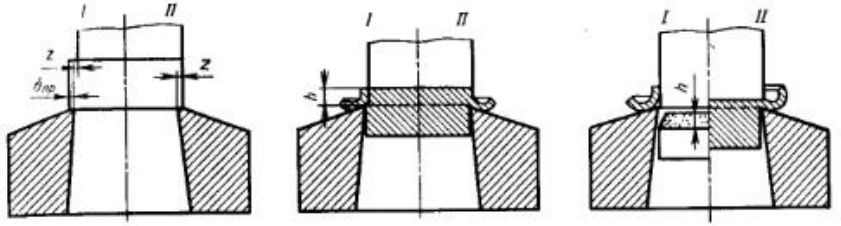


Рис. 16. Последовательные этапы снятия стружки при зачистке с зазором и без него

конфигурацией). Применяют также комбинированные способы: вырубку с одновременной зачисткой в штампах со сдвоенной матрицей, а также пробивку отверстий одновременно с зачисткой ступенчатым пуансоном (рис. 15).

Шероховатость поверхности после зачистки обычно соответствует $Ra = 0{,}63$ мкм, а при зачистке деталей из пластичных цветных металлов и сплавов — $Ra = 0{,}32$ мкм с наличием на верхней кромке детали небольшого скола.

На рис. 16 показаны последовательные этапы отделения (срезания) стружки по двум способам (I и II) при одной и той же величине припуска $\delta_{пр}$. По способу I зачистку осуществляют с зазором между матрицей и пуансоном; по более рациональному способу II зачистку производят пуансоном, превышающим по размерам матрицу, что предотвращает образование скола в верхней части заготовки. Последний способ зачистки не требует точного изготовления и пригонки пуансона по матрице, что существенно снижает стоимость изготовления зачистного штампа.

Способ зачистки пуансоном, превышающим по размерам матрицу, неприменим в случае зачистки сравнительно крупных деталей, когда необходим прижим заготовки.

Одну зачистную операцию применяют при толщине материала до 3—4 мм, а при повышенных требованиях к шероховатости поверхности или более толстых материалах выполняют две зачистные операции.

Если обычную зачистную штамповку применяют в основном для пластичных материалов, то вибрационную зачистку используют как для пластичных, так и для малопластичных, труднодеформируемых в холодном состоянии материалов.

Сущность способа вибрационной зачистки заключается в том, что снятие припуска на зачистку производится при колебательном движении пуансона или матрицы. При этом одна из рабочих частей штампа совершает поступательное перемещение. Возможно также одновременное колебательное и поступательное движение инструмента.

Шероховатость поверхности при вибрационной зачистке достигает $Ra = 0{,}32$ мкм.

Существуют два способа определения припуска на зачистку: первый способ основан на вырубке деталей с большим зазором [$z/2 = (6 \div 8)\ \%\ s$] и получении конического скола на боковой поверхности; второй — на максимальном уменьшении припуска на зачистку, для чего вырубку производят с малым зазором [$z/2 = (2 \div 4)\ \%\ s$]. Каждый из указанных способов имеет свои достоинства и недостатки.

В табл. 8 приведены двусторонние припуски на зачистку по первому способу. Наименьший припуск применяют для зачистки деталей простой формы, а наибольший — для деталей сложной конфигурации.

Усилие зачистки со снятием стружки определяют по формуле

$$P_з = 0{,}5\delta_{пр} L \sigma_{сд} + \sum Q, \qquad (8)$$

где $0{,}5\delta_{пр}$ — односторонний суммарный припуск, мм; L — длина периметра зачистки, мм; $\sigma_{сд}$ — сопротивление сдвигу (разделению), МПа; $\sum Q$ — сумма усилий для проталкивания, сжатия буферов, Н.

8. Двусторонние припуски на зачистку

Толщина материала, мм	Двусторонний припуск, мм		
	Латунь, мягкая сталь	Сталь средней твердости	Твердая сталь
0,5—1,6	0,10—0,15	0,15—0,20	0,15—0,25
1,6—3,0	0,15—0,20	0,20—0,25	0,20—0,30
3,0—4,0	0,20—0,25	0,25—0,30	0,25—0,35
4,0—5,2	0,25—0,30	0,30—0,35	0,30—0,40

Зачистку отверстий применяют в часовой промышленности, а также в точном приборостроении: счетно-пишущие машины, кассовые аппараты, вычислительные машины, приборы-автоматы и т. п.

Более высокая точность размеров отверстий и межцентровых расстояний по сравнению со сверлением в кондукторах обеспечивается пробивкой в совмещенных штампах с последующей зачисткой.

Для определения припуска на зачистку отверстий применяют два способа. Первый способ основан на пробивке с большим зазором и получении отверстия с коническим сколом, а второй — на пробивке с малым припуском. Припуск по диаметру на зачистку отверстий небольшого диаметра ($s > d$) после сверления принимают 0,10—0,15 мм, после пробивки — 0,15—0,20 мм.

При мелкосерийном производстве деталей общепризнанным методом получения высококачественной поверхности разделения (среза) является обычная зачистка, обеспечивающая минимальные расходы на подготовку производства.

Зачистка выглаживанием поверхностей. Сущность этой операции заключается в том, что специальными пуансонами производят пробивку заготовки с припуском на зачистку. При дальнейшем проталкивании отхода через матрицу происходит зачистка пробитого отверстия за счет выглаживания (обжатия) припуска.

Пробивка отверстий с одновременной зачисткой может осуществляться ступенчатым пуансоном (рис. 17, *а*), пуансоном с завалением и притуплением кромкой (рис. 17 *б*, *в*) или пуансоном с торцовой поверхностью в форме остроконечного конуса (рис. 17, *г*).

При пробивке отверстий ступенчатым пуансоном зачистка поверхности осуществляется в результате срезания припуска. При этом траектории скалывания распространяются между режущими кромками первой ступени

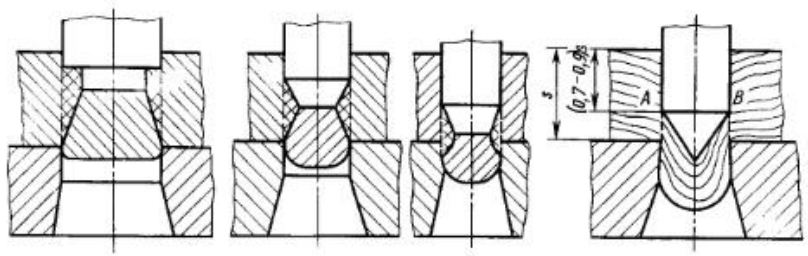


Рис. 17. Схема штамповой зачистки отверстий, совмещенной с пробивкой:
а — пробивка с зачисткой ступенчатым пуансоном; *б—г* — пробивка отверстий с одновременной зачисткой методом обжатия

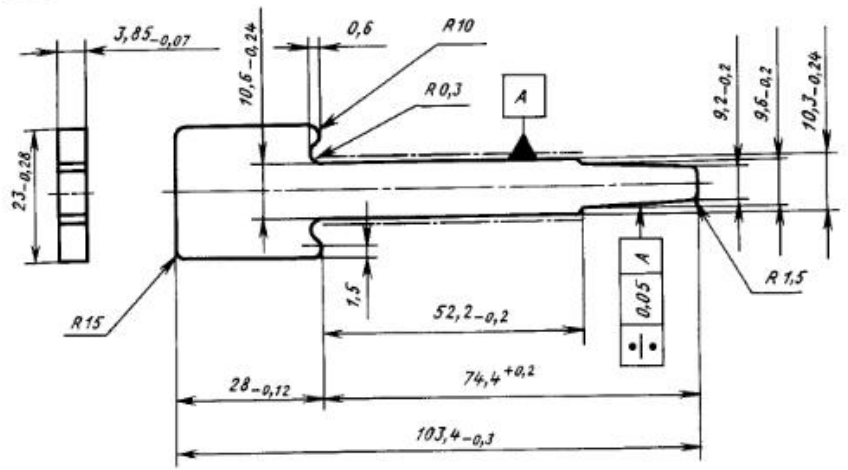


Рис. 18. Базовая деталь — сердечник электромагнитного реле; сталь толщиной 4 мм

пуансона и матрицы. Во втором случае процесс образования отверстия состоит из двух этапов: 1) внедрение пуансона в материал заготовки с продавливанием отхода в рабочее отверстие матрицы без образования скалывающих трещин; 2) возникновение скалывающих трещин, после соединения которых происходит процесс выглаживания (дорнования) остальной части отверстия. В зависимости от рода металла и его толщины, угла завала кромки матрицы первый этап процесса пробивки может продолжаться до внедрения пуансона на $(0{,}5 \div 0{,}7)\,s$. Подобный процесс деформации наблюдается при пробивке отверстий пуансоном, заостренным под углом 60—90°, с той лишь разницей, что трещины скалывания возникают в точках А и В пуансона (рис. 17, *г*) после его внедрения в заготовку на $(0{,}7 \div 0{,}9)\,s$. В этом случае большая часть отверстия формируется при деформации продавливания. Чистовую обработку (пробивку) конусными пуансонами успешно выполняют в штампах совмещенного действия, когда заготовка в процессе обработки находится в зажатом состоянии под действием мощных буферных пружин.

Шероховатость поверхности отверстий, пробитых описанными выше способами, может быть доведена до $Ra = 0{,}63 \div 0{,}08$ мкм, в зависимости от шероховатости поверхности пуансона.

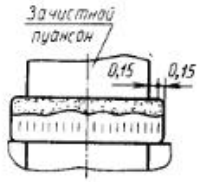
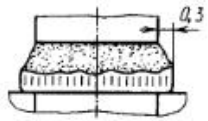
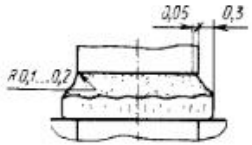
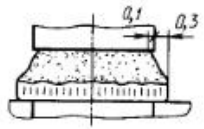
В условиях крупносерийного и массового производства операции обычной зачистки с ручной укладкой заготовок характеризуются низкой производительностью процесса, низкой стойкостью штампов между переточками, наличием острых кромок на деталях и отходах.

Применение автоматической зачистки возможно при выполнении следующих условий: удаление отходов из зоны резки; точная фиксация заготовки перед зачисткой; повышение стойкости штампов.

Схемы припусков и изменение стойкости твердосплавного штампа при штамповке детали, показанной на рис. 18, приведены в табл. 9.

Исследование штампов с отводом отходов по двум—четырем направлениям и подачей заготовок в отверстие съемника, имеющего вставки для точного направления детали и каналы для отвода отхода в направлениях, перпендикулярных к режущим кромкам матрицы, показало возможность автоматизации зачистки. При этом обеспечивается высокая производительность процесса, точное центрирование детали. Сменная производительность таких штампов 17 тыс. нагружений; стойкость между переточками 40—

9. Стойкость твердосплавного штампа в зависимости от схемы припусков

Вариант	Схема припусков	Стойкость штампов до переточки (число нагружений)
I С регламентированным припуском		8 000
II С уменьшенным припуском за счет вырубки с увеличенным зазором		20 000
III Заготовка варианта II, галтованная в течение 30 мин		30 000
IV Малоотходная зачистка заготовки, вырубленной с зазором 23—28 % толщины заготовки с галтовкой		40 000—200 000

100 тыс. нагружений. Зачищенная заготовка имеет точные размеры (75 %-ную часть высоты вертикальной поверхности реза), шероховатость зачищенной поверхности $Ra = 20$ мкм.

2. ВЫРУБКА, ПРОБИВКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДЫ

Общая характеристика. В мелкосерийном и быстропереналаживаемом производстве штамповая оснастка крупносерийного и массового производства оказывается экономически неэффективной из-за высокой стоимости, значительной длительности процессов изготовления и технологической подготовки производства.

В этих условиях применяют универсальную штамповую оснастку, в которой, в частности, используют эластичные среды, обычно резину и полиуретан, выполняющие роль пуансона или матрицы. Резина обладает малой износостойкостью и может работать при относительно невысоком давлении (30—50 МПа), достаточном лишь для штамповки деталей из металлов невысокой прочности толщиной до 2 мм. Полиуретан имеет высокую износостойкость и может работать при давлении до 1000 МПа и выше. Прочность полиуретана в 6—8 раз выше прочности резины. Напряжение при разрыве до 60 МПа, относительное удлинение — до 600 %, остаточная деформация 2—4 %, первоначальная форма хорошо и быстро восстанавливается после нагружения. Полиуретан обладает бензо- и маслостойкостью, что особенно важно при штамповке на гидравлических прессах. Стойкость полиуретана при выполнении разделительных операций на порядок выше, чем у резины, и может составлять 10 тыс. циклов нагружения и больше.

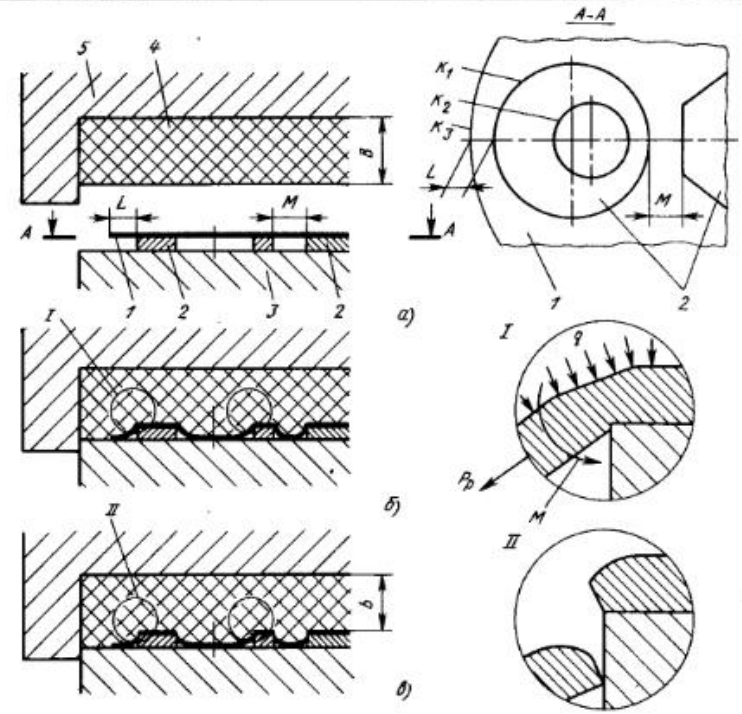


Рис. 19. Схема вырубки и пробивки в штампе с эластичной средой:
а — исходное положение; *б* — промежуточное положение; *в* — окончательное положение: *1* — заготовка; *2* — шаблоны; *3* — подштамповая плита; *4* — эластичная среда; *5* — контейнер

Схемы взаимодействия штампа с заготовкой и технологические параметры. На рис. 19 приведена схема взаимодействия штампа с заготовкой. Заготовку *1* укладывают на шаблонах *2*. Шаблоны лежат на подштамповой (подшаблоиной) плите *3*, установленной на столе пресса. Эластичная среда *4* заключена в контейнере *5*, закрепленном на ползуне пресса. Шаблон представляет собой относительно низкое цилиндрическое или призматическое, сплошное или полое стальное тело с плоскими торцами. Поверхности, сходящиеся к внешнему контуру K_1, выполняют роль пуансона, а сходящиеся к внутреннему контуру K_2, — матрицы. Эластичная среда выполняет роль матрицы по отношению к поверхностям контура K_1 и пуансона — по отношению к поверхностям контура K_2. Контур K_3 заготовки на группу деталей из одного материала огибает внешние контуры шаблонов с технологическим припуском L. Друг от друга внешние контуры

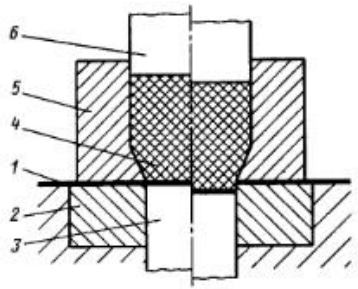


Рис. 20. Схема пробивки отверстия в листе:
1 — заготовка; *2* — сменная матрица; *3* — прижим-выталкиватель; *4* — эластичная среда; *5* — контейнер; *6* — плунжер

шаблонов находятся на расстоянии M, представляющем собой межконтурный технологический припуск. Если материалы деталей, входящих в штампуемую группу, различные или же штампуется только одна деталь, используют штучные заготовки с технологическим припуском L.

При смыкании штампа эластичная среда оказывается в замкнутом пространстве. Когда пресс развивает усилие P, в контейнере создается давление q среды. В расчетах необходимого для разделительной операции усилия P давление q принимают равномерно распределенным.

Под действием давления среды часть заготовки, не опирающаяся на плоские торцы шаблонов, прогибается и приходит в контакт с поверхностью подштамповой плиты, когда прогиб становится равным высоте шаблонов. Прогибы вызывают появление изгибающего момента M (рис. 19, *б*), а на участках заготовки, контур которых неподвижен, — еще и силу растяжения $P_р$. Это участки внутри контуров полостей шаблонов и между внешними их контурами. После того как край заготовки приходит в контакт с плитой, возникает сила трения, препятствующая смещению края к шаблону. Возникает также и сила растяжения $P_р$. Под действием момента M, силы $P_р$ и давления q вдоль контуров шаблонов развивается деформация, сосредоточенная в узкой области — около острых их кромок, которая приводит к сосредоточенному утонению листа. Вместе с тем в него несколько вдавливается режущая кромка. Деформация завершается отрывом технологического припуска (рис. 19, *в*) и разделением листа по заданным контурам.

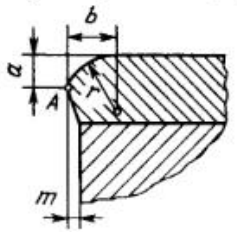


Рис. 21. Сечение поверхности разделения

Пробивку в листе отдельных отверстий осуществляют на универсальном штампе со сменными матрицами (рис. 20).

Усилие пресса вычисляют по формуле

$$P = qF, \qquad (9)$$

где F — площадь сечения полости контейнера, перпендикулярной к направлению P; q — давление среды в контейнере, необходимое для разделения заданного листового материала по самому короткому и узкому замкнутому контуру или узкому незамкнутому контуру на шаблоне (до отверстию или пазу с самым малым поперечником).

Резину применяют при давлении до 30 МПа; рекомендуемая толщина слоя в контейнере $B \geqslant 5h_п$, $(B-b)/B \leqslant 0{,}2 \div 0{,}25$. При $(B-b)/B = 0{,}4 \div 0{,}45$ резина быстро разрывается и разрушается.

Полиуретан применяют при давлении в контейнере до 1000 МПа; толщина пластины в контейнере для разделительных операций $B = 25 \div 30$ мм. Разделяемый материал: алюминиевые сплавы, медь, латунь с временным сопротивлением $\sigma_в < 250$ МПа толщиной до 3 мм; алюминиевые сплавы, латуни, бронзы, углеродистые стали с временным сопротивлением $250 < \sigma_в < 500$ МПа толщиной до 2—2,5 мм; коррозионно-стойкие стали, титановые и магнитные сплавы толщиной до 1,5 мм. Контейнер для таких давлений необходимо рассчитывать на прочность. Полость контейнера во время нагружения должна замыкаться подштамповой плитой с зазором не более 0,2—0,3 мм.

Высоту шаблона определяют по формуле

$$h_п = 3(1 + 0{,}01\,\delta_{10})\sqrt{s}. \qquad (10)$$

Контуры полостей шаблонов выполняют с учетом формы сечения поверхности разделения (рис. 21). Контур поверхности разделения, т. е. геометрическое место точек A сечения, удален от контура шаблона на расстояние m в направлении внешней нормали к рабочей поверхности шаблона. Расстояние m зависит от вида разделяемого материала. Для Д16АМ и АМг6М $m = (0{,}05 \div 0{,}08)\,s$; для АМцМ, М1—М3, Л63, 12Х18Н10Т $m = (0{,}07 \div 0{,}12)\,s$. Контур сечения поверхности разделения характеризуется следующими параметрами: $r \approx s$, $a = (0{,}5 \div 0{,}7)\,s$, $b = (0{,}75 \div 1{,}15)\,s$—для Д16АМ, АМг6М, М1—М3, Л63; $r \approx 0{,}5\,s$, $a = (0{,}25 \div 0{,}45)\,s$, $b = (0{,}35 \div 0{,}65)\,s$ — для сталей Ст3, 10, 20 12Х18Н10Т.

Контур сечения шаблона для штамповки деталей относительно небольших размеров толщиной более 0,5 мм из высокопрочного металла рекомендуется выполнять, как показано на рис. 22 ($\varphi = 10 \div 15°$, $h_р = 0{,}3h_п$). Контур полости шаблона должен быть в виде гладкой линии; состоит из сопряженных отрезков прямой и дуг окружностей; дуги переменной кривизны приводят к увеличению трудоемкости изготовления, поэтому их следует избегать. Наиболее изогнутая дуга коитура должна иметь радиус не меньше толщины разделяемого материала.

При разделении неметаллических материалов следует предусматривать технологическую металлическую накладку (табл. 10), причем высота шаблона принимается равной сумме высоты $h_п$, определенной с помощью формулы (10) по толщине накладки, и толщины разделяемого материала.

Технологический припуск по внешнему контуру шаблона

$$L = (1{,}4 + 1/\mu)\,h_п. \qquad (11)$$

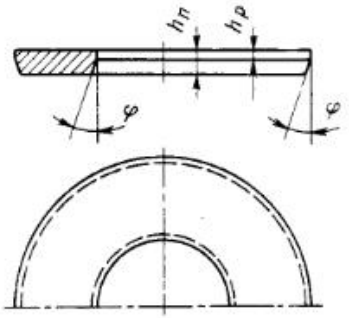


Рис. 22. Шаблон для разделения высокопрочного материала толщиной более 0,5 мм

Коэффициент трения свисающего края припуска по подштамповой плите со шлифованной поверхностью $\mu \approx 0{,}2$; с опескоструенной поверхностью $\mu \approx 0{,}5$. Междуконтурный припуск для группы шаблонов зависит от выбранного давления в контейнере и должен быть не менее поперечного размера наименьшего пробиваемого отверстия.

При разделении малопластичных материалов магниевых и титановых сплавов, закаленного сплава Д16АТ, электротехнических сталей высота шаблона должна быть

$$h_п = (0{,}8 \div 1{,}2)\,s. \qquad (12)$$

технологический припуск

$$L = (4 \div 7)\,s. \qquad (13)$$

Меньшие значения $h_п$ и L соответствуют вырезаемым материалам большей толщины. При высоте шаблона, определенной по формуле (10), поверхность разделения этих материалов получится «рваной». На вогнутых участках контура с относительно большой кривизной поверхность разделения отклоняется от контура шаблона. Высоту уменьшают до необходимого размера обычно за счет использования набора пластин из любого материала, которые вырезают инструментом из полиуретана на вырезном шаблоне высотой 4—5 мм (рис. 23).

Другим способом, существенно повышающим качество поверхности разделения, является вырезка деталей с применением опорных рамок и вкла-

10. Материалы технологической накладки при разделении неметаллических материалов

Обрабатываемый материал			Материал накладки		
Наименование	ГОСТ	Толщина, мм	Марка	ГОСТ	Толщина, мм
Паронит ПМБ	481—80	0,40 0,50—0,60	Сталь Ст3 08кп, 10, 15	380—78 1050—74	0,50 1,0
Кабельная бумага	645—79	0,08—0,15	Сталь Ст3 08кп, 10, 15 Л63	380—78 1050—74 15527—70	0,10—0,15 0,20—0,25
Картон электроизоляционный	2824—75Е	0,10—0,20 0,30 0,50	Сталь Ст3 08кп, 10, 15	380—78 1050—74	0,15—0,20 0,25—0,30 0,50
Слюда	7134—82	0,05—0,10 0,20	Л63	15527—70	0,10—0,15 0,25—0,30
Стеклоткань	10156—78Е	0,08—0,15 0,25	Д1АМ М1, М2 Л63	4784—74 859—78 15527—70	0,25—0,30 0,20—0,30
Пленка электроизоляционная	12508—73	0,08—0,10 0,20	Д1АМ М1, М2 Л63	4784—74 859—78 15527—70	0,20—0,25 0,15—0,20

дышей (рис. 24). На рис. 24, *а* показаны рамка и вкладыш, состоящие из набора пластин, вырезанных полиуретаном по вырезному шаблону и склепанных между собой. На рис. 24, *б* показана опорная рамка, выполненная из проволоки. Для облегчения процесса вырезки с внутренней стороны рамки сделан скос. Ширину l скоса рекомендуется определять по формуле

$$l = \frac{2s\sigma_{сд}}{q} \approx \frac{1{,}5s\sigma_{в}}{q}, \qquad (14)$$

где $\sigma_{в}$ — временное сопротивление материала заготовки; q — давление полиуретана в контейнере.

Отклонение размеров деталей в рассматриваемых случаях (см. рис. 23 и 24) от соответствующих размеров шаблонов составляет $(0{,}1 \div 0{,}15)\,s$.

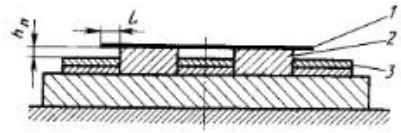


Рис. 23. Схема уменьшения высоты $h_п$ шаблона для разделения малопластичных материалов:
1 — заготовка; *2* — шаблон; *3* — набор пластин

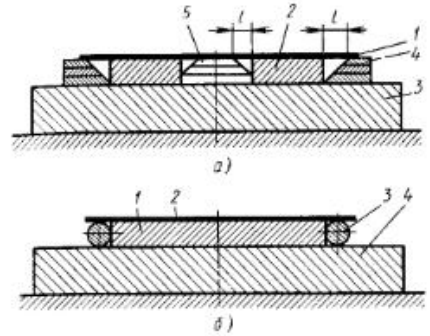


Рис. 24. Шаблоны с опорными вкладышами и рамкой, набранной из пластин (*а*) и изготовленной из проволоки (*б*):
а — *1* — заготовка; *2* — вырезной шаблон; *3* — подштамповая плита; *4* — опорная рамка; *5* — вкладыш; *б* — *1* — заготовка; *2* — вырезной шаблон; *3* — опорная рамка; *4* — подштамповая плита

Давление среды в контейнере, необходимое для вырезки,

$$q = k\sigma_{сд}s, \qquad (15)$$

где k — коэффициент (табл. 11); $\sigma_{сд}$ — сопротивление сдвигу разделяемого материала.

Для пробивки отверстия диаметром $d < 5h_п$

$$q = 4\sigma_{сд}s/d; \qquad (16)$$

диаметром $d = (5 \div 10)\,h_п$

$$q = 4n\sigma_{сд}s/d, \qquad (17)$$

где $n = 1 + 0{,}3\,(d/h_п - 5)$;
диаметром $d > 10$

$$q = \sigma_{сд}sd/1{,}1h_п\,(d - 1{,}57h_п). \qquad (18)$$

Для отверстий со сложным контуром и контуром в виде удлиненного прямоугольника

$$q = \sigma_{сд}sl/F_0, \qquad (19)$$

где l и F_0 — длина контура отверстия и площадь внутри контура.

Усилие пресса определяют по формуле (9) с введением коэффициента запаса, равного 1,3.

3. ЧИСТОВЫЕ РЕЗКА, ВЫРУБКА, ПРОБИВКА

Чистовые (или точные) разделительные операции обеспечивают более высокое качество поверхности разделения по сравнению с обычными способами, основанными на использовании «оптимальных» зазоров между режущими кромками инструмента (рис. 25). Показатели геометрических несовершенств поверхности среза (см. рис. 8) — h_y/s; h_c/s; x/s — в этом случае снижаются, может быть получена поверхность разделения без несовершенства (рис. 25); шероховатость поверхности Ra уменьшается. Это достигается за счет создания в зоне вблизи поверхности сдвига высокого гидростатического давления.

Чистовая разрезка. Принципиальная схема чистовой разрезки полосы или прутка представлена на рис. 26. Способ может быть реализован в специальном штампе. Точность детали обеспечивается до 7 квалитета при получаемой шероховатости поверхности $Ra = 1{,}25$ мкм. Протяженность в направлении оси прутка области, ох-

11. Коэффициент k

Длина внешнего контура детали, мм	Коэффициент k ($мм^{-1}$) при высоте $h_п$ шаблона, мм											
	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	12
До 65	0,51	0,36	0,28	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12	0,09	0,07	0,06	0,03
85—100	0,54	0,40	0,31	0,25	0,21	0,18	0,16	0,15	0,11	0,10	0,07	0,04
200—350	0,58	0,43	0,34	0,28	0,24	0,21	0,19	0,18	0,14	0,11	0,10	0,06
Св. 1000	0,60	0,45	0,36	0,30	0,26	0,23	0,21	0,20	0,15	0,13	0,11	0,07

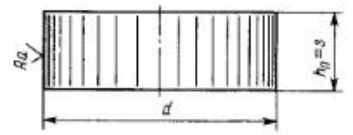


Рис. 25. Поверхность разделения вырубленной деталн

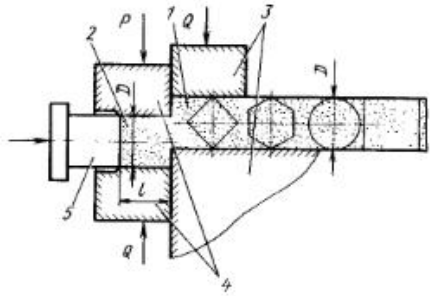


Рис. 26. Схема чистовой разрезки полосы или прутка различного сечения:
1 — материал заготовки; *2* — отрезаемая деталь; *3* — фиксирующий составной нож; *4* — подвижный составной нож; *5* — упор-фиксатор

ваченной пластической деформацией, составляет (0,24—0,32) D (чем пластичнее материал, тем больше протяжеиность). Чистовой разрезке подвергают среднеуглеродистые стали с содержанием углерода 0,08—0,45 %, $\delta_{10} > 16$ % и сплавы цветных металлов

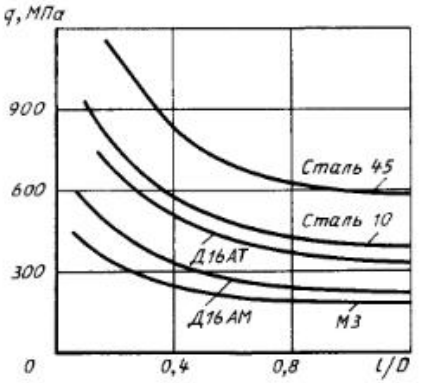


Рис. 27. Зависимость осевого давления от геометрических параметров отрезаемой детали

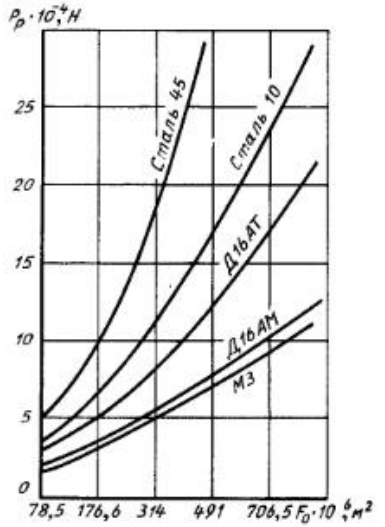


Рис. 28. Зависимость максимального усилия разрезки от исходной площади сечения заготовки

с $\delta_{10} > 12$ %. Минимальная относительная длина l/D до 0,1. Осевое давление q зависит от отношения l/D (рис. 27). При $l/D \geqslant 1$ $q \approx \sigma_в$ для всех обрабатываемых материалов. Ориентация контура поперечного сечения материала относительно направления сдвига в плоскости сдвига практически не влияет на показатели качества получаемых деталей, но влияет на протяженность области пластической деформации и величину деформации.

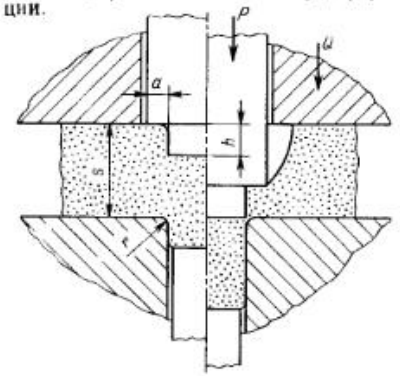


Рис. 29. Схема вырубки ступенчатым пуансоном

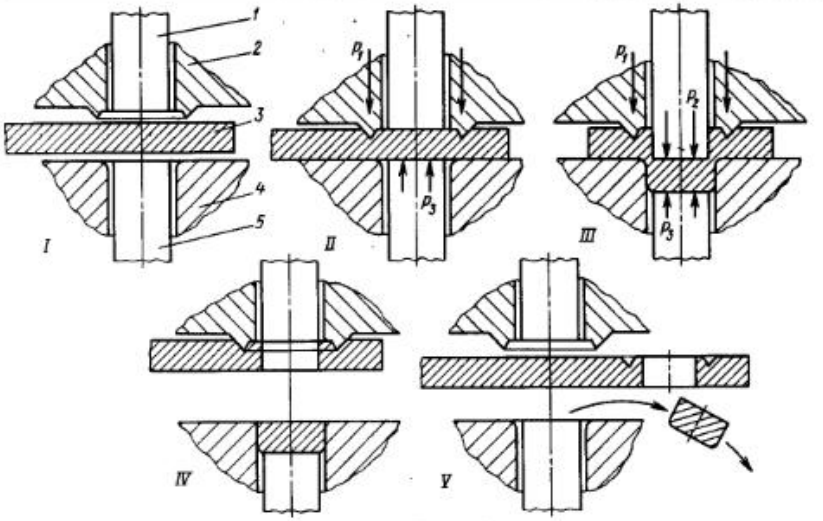


Рис. 30. Схема способа «прямой» чистовой вырубки:
I — ввод заготовки в рабочую зону штампа; *II* — обжатие заготовки ребром прижима; *III* — вырубка пуансоном; *IV* — снятие отхода с пуансона и разъем блока штампа; *V* — выброс детали и перемещение заготовки на технологический шаг; *1* — пуансон; *2* — прижим; *3* — заготовка; *4* — матрица; *5* — контрпуансон

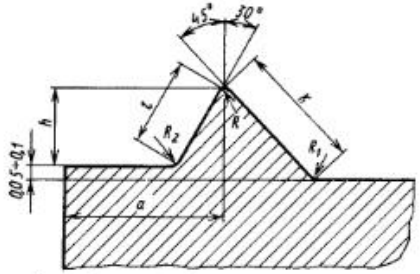
Осевое давление приводит к увеличению сопротивления сдвигу на 60—70 %. Соотношение силовых параметров следующее: $0,8 < Q/P \leqslant 1$. Коэффициент трения скольжения металла по поверхности инструмента $\mu = 0,25$. Выталкивание детали из полости ножа осуществляется прутком, когда нож принимает исходное положение. Усилие выталкивания составляет (0,15÷0,3) P при $P = P_p$. Максимум усилия приходится на начало рабочего хода — при внедрении ножа на (0,05÷0,15) D, после чего усилие плавно снижается. Значение P_p зависит от исходной площади сдвига — F_0 (рис. 28).

Чистовые вырубка—пробивка. При чистовых вырубке—пробивке точность размеров обработанных поверхностей детали обеспечивается до 7 квалитета с шероховатостью по всей высоте поверхности разделения до $Ra = 1,25$ мкм. Существует несколько способов чистовой вырубки—пробивки. Ниже приведены наиболее распространенные.

Схему способа вырубки ступенчатым пуансоном (рис. 29) применяют для простых контуров вырубки при толщине обрабатываемого материала не более 0,003 м. Необходимое для повышения пластичности гидростатическое давление в зоне поверхности сдвига создается за счет осадки части заготовки, расположенной под ступенькой a пуансона. Осадка начинается после внедрения центральной ступени пуансона на глубину h, при которой еще нет признаков разрушения материала. Высота центральной ступени пуансона $h = (0,3 \div 0,35)\,s$. Ширина ступени $a = 0,5\,s$ для сталей с содержанием углерода 0,08—0,45 %, $\delta_{10} > 16$ %; $a = (0,3 \div 0,35)\,s$ для сплавов цветных металлов с $\delta_{10} > 12$ %.

В описанном способе применение острых углов в плане проема матрицы исключается. Вершины углов должны быть выполнены по радиусам r не менее (0,5÷0,6) s для стали и (0,2÷0,3) s — для сплавов цветных металлов. Режущая рабочая кромка матрицы должна быть скруглена: $r = (0,05 \div 0,08)\,s$ для сталей и $r = (0,1 \div 0,15)\,s$ — для сплавов цветных металлов.

Усилие вырубки $P = (2,5 \div 2,8)\,Ls\,\sigma_в$, где L — длина контура вырубаемой детали (по периметру).



$h=(0,2\div0,3)\,S$ $a=(1\div2)\,h$ $r=1,2h$ $x=1,4$ $R\leqslant0,2h$
$R_1=0,3h$ $R_2=0,15h$

Рис. 31. Геометрические параметры клинового ребра на прижиме ($x = 1,4h$) (см. также гл. 18, табл. 4)

Усилие прижима заготовки

$$Q = (0,2\div0,3)\,P.$$

Схема способа «прямой» чистовой вырубки (рис. 30). Повышение гидростатнческого давления и пластнчности материала в зоне сдвига достигается путем внедрения ребра вблизи поверхиости разделения. Ребро размещают на прижиме (рис. 31). Рабочую кромку матрицы притупляют при отладке штампа; прнтуплеиие до 0,1s (появление заусенца на получаемой детали ие исключается).

В способе могут быть примеиеиы штампы, выполиенные по различиым схемам (рис. 32), требующим приме-

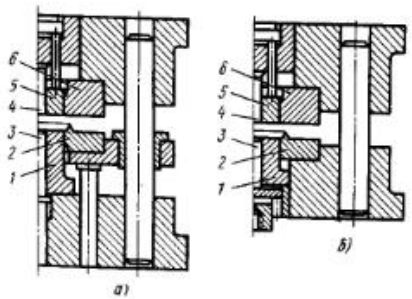


Рис. 32. Схемы конструкций штампов для чистовой вырубки—пробивки:

а — штамп с неподвижной пуансон-матрицей; *б* — штамп с подвижиой пуансон-матрицей; *1* — пуансон-матрица; *2* — прижим; *3* — осевой контрпуансон; *4* — осевой пуансон; *5* — кольцевой контрпуансон; *6* — матрица

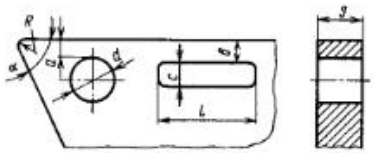


Рис. 33. Геометрические параметры вырубаемой детали

нения специальных прессов тройного действия. Реализация этого способа возможна и при использоваиии модернизированных универсальных прессов, обеспечивающих требуемые действия и высокую жесткость конструкции. При этом, согласио схемам штампов, показанным на рис. 32, качественная поверхность среза у деталей (типа кольцо) будет обеспечиваться по внешнему контуру, т. е. у ребра прижима. Процесс сдвига аналогичеи схеме, прнведениой иа рис. 30.

При испольэовании немодернизированиых универсальных прессов требуемые движеиия и действия обеспечиваются конструкцией штампов. Геометрические параметры детали (рис. 33) должны отвечать требованиям технологичностн. Их определяют с помощью специальиых графиков (рис. 34). Графики прнведены для материалов с временным сопротивлеиием $\sigma_в = 500$ МПа и отиосительным удлиие-инем $\delta_{10} > 16\,\%$. Для материалов с другими прочностиыми характеристикамн значеиия искомых параметров определяют пропорциоиально измеиению предела прочности. При выполиении указаиных требований поверхность разделеиия не будет иметь следов разрушения, утяжка $h_y/s = 0,1\div0,25$.

Чистовую вырубку данным способом можно совмещать с гибкой; при этом угол гибкн ие должеи превышать 75°, а параллельное смещеиие участков одной плоскостн заготовки ие должно превышать значеннЯ ее толщины.

Вырубка может быть совмещена с клеймением знаков на поверхиости детали, с выполнением объемного деформироваиия, с осадкой отдельных областей на величину не более 0,4—0,5 s. При этом могут быть оформлены коннческие углубления на глубну до

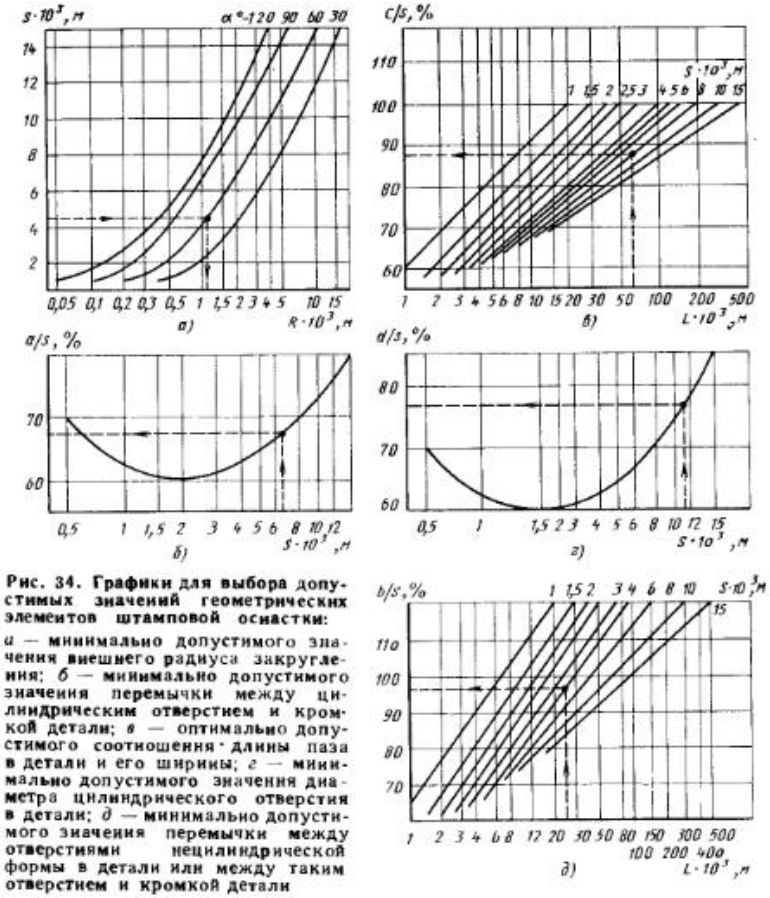


Рис. 34. Графики для выбора допустимых значеиий геометрических элемеитов штамповой оснастки:

а — минимальио допустимого значения внешнего радиуса закругления; *б* — минимально допустимого значеиия перемычки между цилиндрическим отверстием и кромкой детали; *в* — оптимально допустимого соотиошеиия длины паза в детали и его ширины; *г* — минимально допустимого значения диаметра цилиндрического отверстия в детали; *д* — минимально допустимого значения перемычки между отверстиями нецилиндрической формы в детали или между таким отверстием и кромкой детали

0,25 s; утолщение материала по контуру углубленнЯ на $(0,03\div0,05)\,s$.

Поверхностн матрицы н пуансона выполняют с положительным зазором z, который выбирают по графнку, приведенному на рис. 35. До толщины $s = 1,5\cdot10^{-3}$ м иа все матерналы заготовок рекомендуется выполнеиие одностороннего зазора $z = (0,005\div0,008)\,10^{-3}$ м

Способ предполагает проведение дополнительиых операций для удалеиия заусенцев иа полученных деталях: галтовки, сошлифовки или травления.

Реверсивный способ чистовой вырубки (рис. 36). В процессе обжатия ребром прижнма деталь надрезается до 20 % от s в сторону, обратную направлению окончательной вырубки.

Цикл даниого способа аналогичен циклу прямой чистовой вырубки, показаиному на рис. 36. Основное отличие состоит в характере деформацин заготовки в зоне реза. Холостой ход, сиятие отхода с пуансоиа, выброс готовой детали и перемещеиие заготовки иа технологический шаг аналогичны позициям *IV* и *V* (см. рис. 36). Геометрия призматического ребра прижима показана на рис. 37. Проем прижима в этом случае является точиым зеркальным отражением проема матрицы.

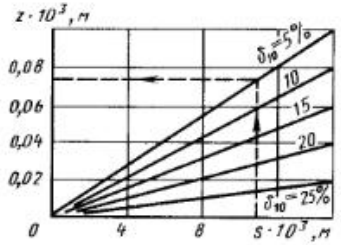


Рис. 35. График для выбора зазора между режущими кромками штамповой оснастки

Применение ребра показанной конструкции позволяет уже в процессе обжима надсечь деталь из листа (в сторону, обратную направлению окончательной вырубки пуансоном) на величину $(0{,}15 \div 0{,}2)\,s$. Появившийся в результате надсечки поясок на поверхности разделения детали препятствует образованию заусенца на заключительной стадии вырубки (см. рис. 36, поз. *III*).

Конструкции прижимов для прямого и реверсивного способов приведены на рис. 38 [$h_в$ — высота выступа контактной площадки прижима, выполненного для предупреждения повреждения ребра при наладке процесса; принимают $h_в < s$ на $(0{,}008 \div 0{,}01)\ 10^{-3}$ м].

Реверсивный способ следует применять при обработке тонколистовых (до $1 \cdot 10^{-3}$ м) высокоуглеродистых сталей, с содержанием углерода 0,7—1 % и $\delta_{10} = (12 \div 17)$ % для исключения появления относительно большого заусенца на деталях.

Односторонний зазор между режущими кромками инструмента в любых случаях не должен превышать $(0{,}005—0{,}008)\ 10^{-3}$ м.

Расчет усилий. Общее усилие вырубки в приведенных выше способах определяют по формуле $P = P_1 + P_2 + P_3$, где P_1 — усилие обжатия заготовки прижимом при внедрении ребра в материал заготовки; P_2 — собственно усилие вырубки; P_3 — усилие противодавления.

Для прямого способа чистовой вырубки усилие внедрения клинового ребра рассчитывают по формуле

$$P_1 = kL_1 s\sigma_т,$$

где L_1 — длина ребра, взятая по его вершине (см. рис. 33); k — коэффициент (рис. 39).

Так как внедрение ребра сопровождается обжатием материала заготовки контактным пояском прижима, то

$$P_1 = (1{,}5 \div 2)\, kLs\sigma_т.$$

Для ребра, имеющего форму, показанную на рис. 35, усилие обжатия заготовки подсчитывают по зависимости $P_1 = (3{,}74 \div 4)\, Ls\sigma_т$. При этом следует учесть, что при данном способе всегда $k = 1$.

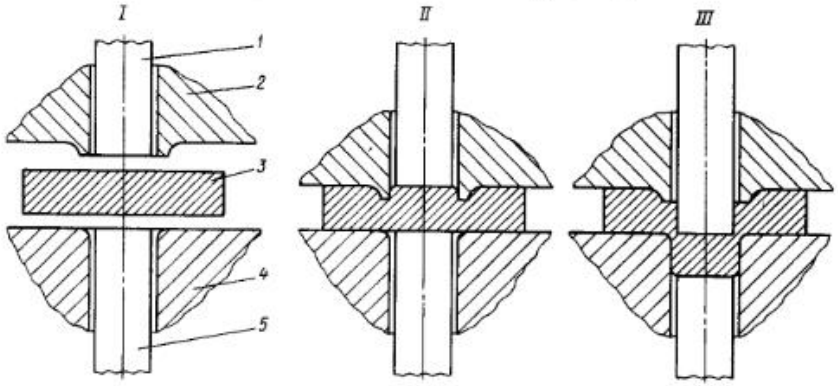


Рис. 36. Схема способа реверсивной чистовой вырубки:
I — пуансон; *2* — прижим (с прямоугольным ребром); *3* — заготовка; *4* — матрица; *5* — контрпуансон (выталкиватель); *I* — исходное положение; *II* — выдавливание рифта; *III* — вырубка

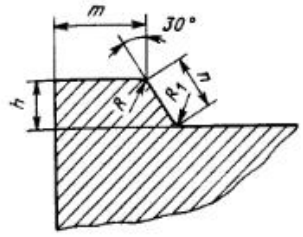


Рис. 37. Параметры призматического ребра для реверсивной вырубки [$h = (0{,}15 \div 0{,}2)\ s$; $m = (0{,}3 \div 0{,}4)\ s$; $n = 1{,}2\ h$]

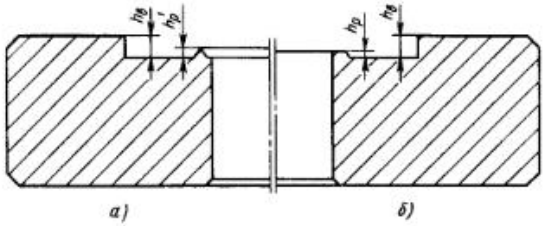


Рис. 38. Конструкция прижима для штампов «прямой» чистовой вырубки (*а*) и для штампов «реверсивной» чистовой вырубки (*б*)

Усилие собственно вырубки в этих способах составляет

$$P_2 = (5s/D + 1{,}25)\, \sigma_т Ls,$$

где L — длина контура детали.

В расчетах реверсивного процесса следует учесть, что общая высота реза для пуансона уменьшена на величину внедрения призматического ребра.

Усилие противодавления при способе прямой чистовой вырубки больше: $P_3 = (0{,}1 \div 0{,}2)\, F\sigma_т$, где F — площадь детали. При реверсивном способе это значение меньше на 50—60 %.

Усилие удаления детали из матрицы и снятия отхода с пуансона $P' = (0{,}1 \div 0{,}25)\, P_2$.

Проведение процессов чистовой вырубки и пробивки вследствие высоких контактных напряжений на рабочем инструменте требует применения специальных технологических смазочных материалов: ХС-147; ХС-163.

Для лучшего удержания смазочного материала в зоне контактной пары инструмент—заготовка рабочие поверхности штамповой оснастки, входящие в скользящий контакт с обрабатываемым материалом, необходимо обрабатывать электроэрозионными методами, обеспечивающими поверхностную структуру замкнутых «карманов», удерживающих смазочный материал при больших контактных напряжениях.

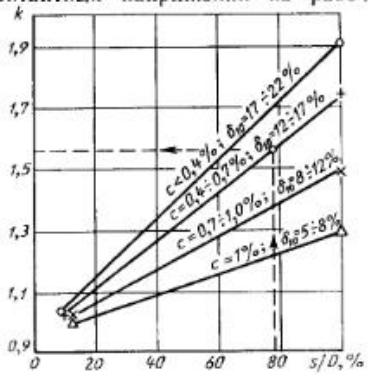


Рис. 39. График выбора коэффициента k для расчета силовых (энергетических) параметров процесса «прямой» чистовой вырубки — пробивки (D — диаметр детали в плане)

4. ТОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПЕРАЦИЙ ВЫРУБКИ, ПРОБИВКИ, ЗАЧИСТКИ

В операциях вырубки и пробивки формируются поверхности детали по внешнему и внутренним контурам. Эти поверхности в той или иной мере приближаются к заданным по чертежу цилиндрическим или плоским поверхностям.

При обычной вырубке и пробивке задают точность размеров контуров разделения и не задают точность элементов самой поверхности разделения. При чистовой вырубке, пробивке и зачистке точность задают в отношении и того, и другого. Контур разделения связан с контуром, по которому располагается режущая кромка инструмента: при вырубке — с контуром проема матрицы; при пробивке — с контуром пуансона.

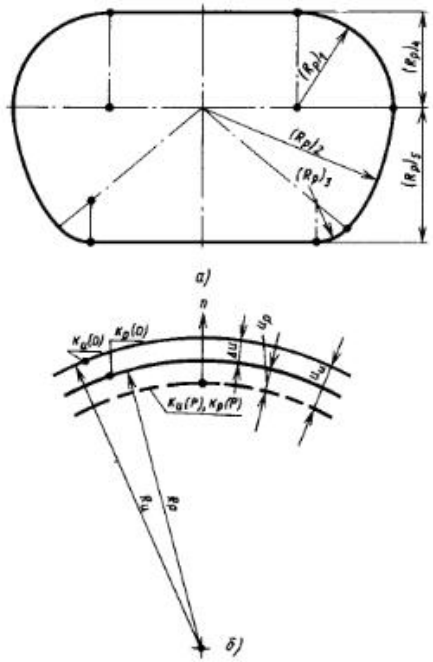


Рис. 40. Контур разделения (*а*) и схема упругих смещений контуров (*б*) при разгрузке штампа

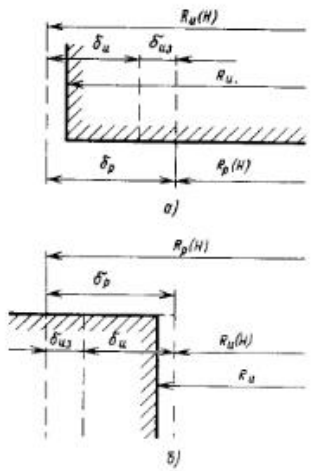


Рис. 41. Связь полей допусков: $\delta_и$ — на размер $R_и(H)$, $\delta_{из}$ — на износ инструмента, $\delta_р$ — на размер $R_р(H)$ контурв разделения; *а* — для вырубки; *б* — для пробивки

Когда жесткие пуансон и матрица и обрабатываемый материал находятся под действием внешней нагрузки P, контуры $K_и(P)$ и $K_р(P)$, (рис. 40, *б*), по которым располагается режущая кромка инструмента, и поверхности разделения совпадают. При разгрузке контуры расходятся, так как их упругие смещения неодинаковы. На рис. 40, *б* показаны проекции $u_и$ и $u_р$ смещений контуров на плоскость листа (зеркала матрицы), направленные в одну сторону по внешней нормали n. Они могут быть направлены и в разные стороны. Величина и направление $u_и$ и $u_р$ зависят от схемы взаимодействия обрабатываемого материала с инструментом, конструкции инструмента и узлов его крепления к плитам штампа, а также от механических свойств и толщины листового материала. Конструкции штампов для разделительных операций обычно имеют высокую жесткость, в них предусматривают прижимные устройства, предотвращающие прогибы материала, располагающегося как с одной, так и с другой стороны от поверхности разделения. Поэтому смещения $u_и$ и $u_р$ и расстояние $\Delta u = u_и - u_р$ между контурами $K_и(0)$ и $K_р(0)$ обычно в несколько раз меньше, чем поле $\delta_и$ допуска на отклонение размера $R_и$ контура $K_и(0)$ от номинального значения $R_р(H)$, предусматриваемого в технологии изготовления штампа (рис. 41). Поле $\delta_р$ допуска на размер $R_р(H)$ взято как положительное, но оно может быть разложено на положительную и отрицательную части, в соответствии с принятой системой допусков и видом сопряжения (посадки) с другой деталью. На рис. 41, *а* и *б* показана схема расположения полей допусков: $\delta_и$ на размер $R_и(H)$ инструмента; $\delta_{из}$ — на износ; $\delta_р$ — на размер $R_р(H)$ контура разделения. Поля допусков $\delta_и$ и $\delta_{из}$ связаны еще с полем допуска на технологический зазор между контурами, по которым располагаются режущие кромки матрицы и пуансона.

Рассеивание размера $R_р$ в партии деталей, отштампованной на новом инструменте за период штамповки до первой переточки, не превышает сумму $\delta_{из} + \Delta u$. При первой переточке с зеркала матрицы удаляют слой металла, в котором располагается основная часть изношенного участка. Но последствия изнашивания полностью не устраняются. Размер контура изношенного инструмента, равный $R_и \pm \delta_{из}$, после переточки равен $R_и \pm \pm \Delta\delta_{из}$, где $\Delta\delta_{из}$ — оставшаяся от поля $\delta_{из}$ часть. Рассеивание размера $R_р$ в деталях двух партий при таком же допуске $\delta_{из}$ на износ будет не больше суммы $\delta_{из} + \Delta u + \Delta\delta_{из}$. С увеличением числа переточек последствий изнашивания накапливается все больше и больше, и рассеивание размера $R_и$ увеличивается. Если режущая кромка матрицы образована пересечением конической (или пирамидальной) поверхностью с плоскостью зеркала, размер $R_и$ увеличивается при каждой переточке. При снятии слоя толщиной Δh за одну переточку размер $R_и$ увеличивается на

$$\Delta R_и = 2\Delta h \operatorname{tg}\alpha,$$

где α — угол при вершине конуса (пирамиды).

Последовательность расчета полей допусков зависит от того, что задано: поле $\delta_р$ допуска на размер контура разделения или же точность изготовления инструмента, принятая или достижимая в условиях инструментально-штампового подразделения данного производства. Если задано поле $\delta_р$, вычисляются поля $\delta_и$ и $\delta_{из}$; если принято поле $\delta_и$, назначается поле $\delta_{из}$ и вычисляется поле $\delta_р$.

При вырубке и пробивке с помощью эластичной среды, выполняющей роль матрицы или пуансона соответственно, в нагруженном состоянии штампа контур разделения не совпадает с контуром, по которому располагается режущая кромка жесткого инструмента (рис. 21). Расстояние m между контурами может несколько меняться из-за нестабильности механических свойств обрабатываемого материала, условий трения и давления эластичной среды. В мелкосерийном производстве, износ шаблонов незначительный, поэтому основное влияние на точность деталей оказывает стабильность расстояния m. Методика расчета параметров точности такая же, как и для жесткого инструмента, но вместо

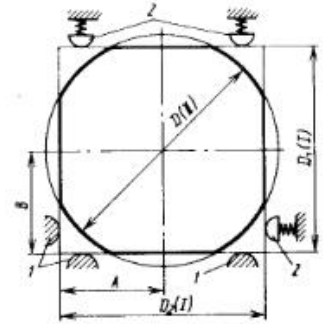


Рис. 42. Схема базирования заготовки при вырубке по незамкнутому контуру разделения

параметра $\delta_{из}$ вносится параметр Δm, отражающий разброс значений m.

При вырубке по незамкнутому контуру контур детали состоит из двух разнородных частей: части контура заготовки и части, представляющей собой контур разделения. Каждый из них имеет определенную точность. Чтобы составной контур детали имел заданную точность, необходимо назначить точность взаимного положения обеих частей. В штампе должно быть устройство для фиксации (базирования) контура заготовки относительно контура матрицы. Следовательно, точность взаимного положения контуров определяется точностью положения базовых поверхностей упоров фиксирующего устройства и надежностью его работы. Например, заготовка определенной точности имеет прямоугольный контур с размерами $D_1(I)$ и $D_2(I)$. Контур вырубки представляет собой окружность диаметра D (II) (см. рис. 42). Фиксирующее устройство состоит из трех жестких упоров *1* и трех упругих поджимных узлов *2*. Оно фиксирует положение двух сторон заготовки относительно центра окружности диаметра D (II) с определенной точностью, которая задется точностью исполнения размеров A и B, жесткостью упоров *1* и стабильностью работы поджимных устройств. Точность положения двух других сторон прямоугольного контура ниже, поскольку она зависит от двух отклонений, связанных с точностью прямоугольного контура и точностью фиксации.

Глава 3 ГИБКА

1. ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЗАГОТОВКИ, ВИДЫ ГИБКИ

Формоизменение заготовки рассматривают в неподвижной цилиндрической системе координат ρ, θ, z. Если кривизна заготовки равна нулю, цилиндрическая система координат переходит в прямоугольную систему x, y, z (рис. 1, *а*).

Формоизменение заготовки характеризуется не только изменением формы ее внешних поверхностей, но и изменением воображаемых материальных поверхностей (бесконечно тонких слоев), мысленно проведенных внутри заготовки (на схеме — через произвольно выбранную точку A).

При гибке заготовки с нулевой начальной кривизной какой-либо слой, параллельный плоскости z, x, движется, изменяет свою кривизну, удлиняется или укорачивается как в продольном (по координате θ), так и в поперечном направлении, принимая форму цилиндрической или нецилиндрической материальной поверхности. Причем эта поверхность может быть как круговой, так и некруговой.

По характеру формоизменения материальной поверхности различают следующие виды гибки: круговая цилиндрическая; круговая нецилиндрическая; некруговая цилиндрическая; некруговая нецилиндрическая.

Признаки круговой цилиндрической гибки следующие:

слои, параллельные плоскостям координат x, y и y, z, остаются плоскими, ортогональными любому цилиндрическому слою радиусом ρ (вначале плоскому, параллельному плоскости z, x, имеющему координату y);

форма и площадь сечения плоскостью z, ρ (вначале плоскостью y, z) не меняются по углу θ;

в исходном состоянии материал однороден по координатам z и x, а в процессе гибки — по координатам θ и z;

изгибающий момент и продольная нагрузка, меняясь при гибке по времени t, остаются постоянными по координате θ;

внешняя поперечная нагрузка равномерно распределена как по координате θ, так и z;

осевая нагрузка равномерно распределена по координате θ и имеет такие величину и характер распределения по координате ρ, что сохраняется первый признак.

Во время гибки размеры заготовки могут меняться в продольном (по координате θ), поперечном (по координате z) и в другом поперечном (по координате ρ) направлениях. Продольный размер различных цилиндрических слоев меняется в зависимости от их расстояния до внешних слоев, изменяется и само это расстояние. Поэтому об изменении продольного размера L заготовки судят по изменению геометрической (не материальной) срединной поверхности радиусом $\rho\,(s/2)$, равноудаленной от внешних (граничных) слоев радиусов ρ_0 и ρ_k.

Имеется также цилиндрическая геометрическая поверхность радиусом $\rho\,(\varepsilon_\theta = 0)$ с неизменным продольным размером $L = L\,(0)$, т. е. поверхность постоянной длины или нулевой окружной деформации. Ее положение относительно внешних слоев может меняться по времени t. В частности, она может совпадать со срединой поверхностью. Тогда длина изогнутой детали равна исходной длине заготовки. Если поверхность радиусом $\rho\,(\varepsilon_\theta = 0)$ располагается с вогнутой стороны от срединной поверхности, длина заготовки в процессе изгиба увеличивается, а если с выпуклой — сокращается.

Цилиндрические слои заготовки движутся относительно внешних слоев: при увеличении ее кривизны — от вогнутого внешнего слоя к выпуклому

внешнему слою, а при сокращении кривизны — наоборот.

Кроме названных, имеются еще геометрические поверхности, обладающие тем свойством, что в слоях, принявших мгновенное положение этих поверхностей, какая-либо скорость деформации материальной частицы (точка A) — радиальная $\dot{\varepsilon}_\rho$ или окружная $\dot{\varepsilon}_\theta$ (рис. 2) (в частности, и та, и другая) — равна нулю, или же напряжение σ_θ (или σ_z) меняет знак, проходя через нуль. Это геометрические поверхности нулевой радиальной (радиусом $\rho\,(\dot{\varepsilon}_\rho = 0)$) или нулевой окружной (радиусом $\rho\,(\dot{\varepsilon}_\theta = 0)$) скорости деформации (рис. 1, *б*) и нулевого окружного (или осевого) напряжения (на рис. 1 не показаны).

Признаки круговой нецилиндрической гибки следующие:

слои, вначале параллельные плоскости z, x, превращаются в материальные поверхности вращения относительно оси z (сечение каждой такой поверхности плоскостью z, ρ представляет собой кривую — образующую поверхности, обращенную выпуклостью к оси z);

слои, параллельные плоскости x, y, также превращаются в поверхности вращения (конические, но с криволинейными образующими);

слои, параллельные плоскости y, z, остаются плоскими, ортогональными к двум другим слоям — материальным поверхностям вращения;

форма и площадь сечения плоскостями z, ρ не меняются по координате θ, но меняются по времени t;

материал в исходном состоянии однороден по координате x, а в процессе гибки — по координате θ;

изгибающий момент и продольная нагрузка остаются постоянными по координате θ, но меняются по t;

внешняя поперечная нагрузка равномерно распределена по координате θ;

осевая нагрузка отсутствует; если же она есть, то равномерно распределена по θ, но не обеспечивает сохранение плоскостности слоев, первоначально параллельных плоскости x, y;

имеются геометрические поверхности с радиусами $\rho\,(s/2)$, $\rho\,(\varepsilon_\theta = 0)$, $\rho\,(\varepsilon_\rho = 0)$, $\rho\,(\sigma_\theta = 0)$, названные выше.

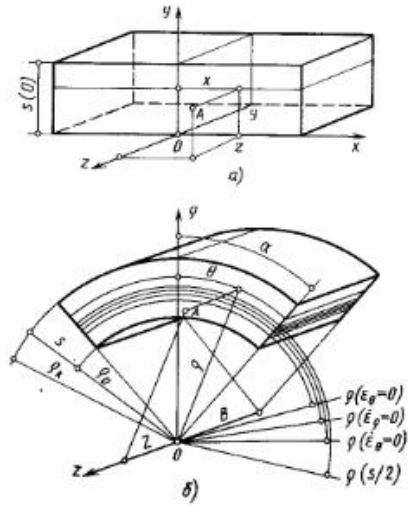


Рис. 1. Координаты точки A (материальной частицы) в неизогнутой (*а*) и в изогнутой (*б*) заготовке

При некруговой цилиндрической и некруговой нецилиндрической гибке отсутствуют перечисленные выше признаки в отношении неизменности геометрических и силовых параметров по координате θ. Плоские слои, параллельные плоскости y, z, не остаются плоскими.

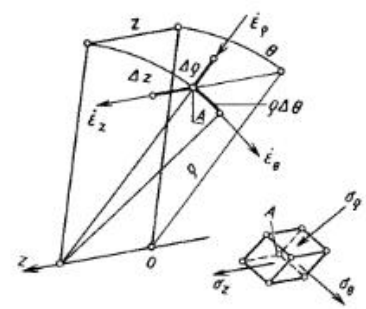


Рис. 2. Схема скоростей деформации малых волокон, исходящих из точки A, и схема напряжений

2. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Круговая цилиндрическая гибка. Радиус срединной поверхности определяют по формуле

$$\rho\,(s/2) = \rho_0 + s/2 = \rho_k - s/2; \quad (1)$$

длина срединной поверхности в растворе угла α

$$L\,(s/2) = \rho\,(s/2)\,\alpha. \quad (2)$$

Радиус и кривизна поверхности нулевой окружной деформации

$$\rho\,(\varepsilon_\theta = 0) = L\,(0)/\alpha$$

$$\chi = 1/\rho\,(\varepsilon_\theta = 0) = \alpha/L\,(0). \quad (3)$$

Кинематика движения наиболее проста, когда эта поверхность находится на неизменном расстоянии a от поверхности радиуса ρ_0:

$$\rho\,(\varepsilon_\theta = 0) = \rho_0 + a. \quad (4)$$

При выполнении равенства (4) плоский слой, содержащий точку A, с координатой y и с исходными длиной $L = L\,(0)$ и шириной $B = B\,(0)$ становится цилиндрическим с координатой ρ, длиной L и шириной B. Эти координаты связаны равенством

$$\rho = \sqrt{2L\,(0)\,B\,(0)\,y/B\alpha + \rho_0^2}, \quad (5)$$

причем

$$s = \sqrt{2L\,(0)\,B\,(0)\,s\,(0)/B\alpha + \rho_0^2} - \rho_0. \quad (6)$$

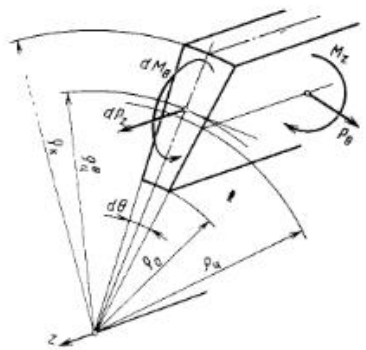


Рис. 3. Схема действия изгибающих моментов и сил на элемент листа

Поверхности нулевых радиальной и окружной скоростей деформации имеют радиусы

$$\rho^2\,(\dot\varepsilon_\rho = 0) = 2\rho_0\,(\rho_0 + a)/(1 + \varepsilon_z) - \rho_0^2; \quad (7)$$

$$\rho^2\,(\dot\varepsilon_\theta = 0) = \rho^2\,(\dot\varepsilon_\rho = 0) \times$$

$$\times\,(\dot\alpha + \dot\varepsilon_z\alpha)/(\dot\alpha - \dot\varepsilon_z\alpha),\ \dot\alpha = \alpha d/dt. \quad (8)$$

В биметаллической заготовке или в заготовке, состоящей из k слоев толщиной Δy_i, $s\,(0) = \sum_1^{i=k} \Delta y_i$, толщина слоев при гибке меняется поразному в зависимости от их положения. Координата y_i границы между слоями в плоской заготовке и координата ρ_i этой же границы в процессе гибки связаны равенством (5). При заданных координатах y_i границ между слоями

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i,$$

а мгновенная толщина слоя $\Delta\rho_i = \rho_{i+1} - \rho_i$.

Изгибающий момент относительно оси, параллельной оси z. Изгибающий момент M_z берут относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения заготовки плоскостью z, ρ. Для прямоугольного сечения заготовки координата центра тяжести (радиус центральной линии) $\rho_ц = \rho_0 + s/2 = \rho\,(s/2)$ (рис. 3). Изгибающий момент на единицу размера $B\,(0)$ определяют по формуле

$$M_z\,(B = 1) = e^{\varepsilon_z} \int_{\rho_0}^{\rho_k} \sigma_\theta\,(\rho - \rho_ц)\,d\rho. \quad (9)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 1. Они представлены в виде безразмерного момента $m_z = M_z/[As^2\,(0)\,B\,(0)]$.

При относительно небольшой кривизне $(s\,(0)/\rho_0 \leqslant 0{,}2)$ влияние напряжения σ_ρ на M_z не учитывают, и при $B = B\,(0) = \text{const}$ формула (9) принимает следующий вид:

$$M_z\,(B = 1) = 2\sigma_{т0}\,(s - a)\,a/\sqrt{3} +$$

$$+ 2\Pi\,(\rho_ц s - \rho_0\rho_k \ln\rho_k/\rho_0)/3, \quad (10)$$

где $\sigma_{т0}$, Π — константы линейной аппроксимации кривой упрочнения.

1. Безразмерный момент $m_z = M_z/[As^2\,(0)\,B\,(0)]$

$\rho_0/s\,(0)$	$a/s(0)$ = 0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0{,}1,\ k = 0$						
10	0,0244	0,0844	0,1348	0,1725	0,1960	0,2056	0,2022	0,1858	0,1595	0,1209	0,0736
7	0,0265	0,0872	0,1403	0,1773	0,2012	0,2126	0,2112	0,1977	0,1731	0,1386	0,0960
5	0,0286	0,9184	0,1435	0,1815	0,2060	0,2192	0,2200	0,2090	0,1898	0,1606	0,1220
3	0,0321	0,0948	0,1471	0,1868	0,2140	0,2292	0,2346	0,2316	0,2188	0,2024	0,1773
2	—	0,0973	0,1496	0,1897	0,2180	0,2370	0,2476	0,2506	0,2486	0,2416	0,2304
1	—	0,0991	0,1502	0,1910	0,2232	0,2488	0,2698	0,2868	0,3002	0,3122	0,3244
0,5	—	0,0956	0,1451	0,1873	0,2246	0,2584	0,2898	0,3198	0,3490	0,3780	0,4074
					$n = 0{,}2,\ k = 0$						
10	0,0300	—	0,1000	0,1240	0,1400	0,1460	0,1440	—	0,1160	—	0,0600
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0,0340	—	0,1120	0,1400	0,1580	0,1660	0,1680	—	0,1460	—	0,0980
3	0,0380	—	0,1200	0,1500	0,1720	0,1820	0,1860	—	0,1740	—	0,1440
2	—	—	0,1260	0,1680	0,1800	0,1940	0,2040	—	0,2040	—	0,1920
1	—	—	0,1340	0,1720	0,1940	0,2160	0,2320	—	0,2580	—	0,2800
0,5	—	—	0,1340	0,1720	0,2040	0,2320	0,2600	—	0,3100	—	0,3640
					$n = 0{,}3,\ k = 0$						
10	0,0298	0,0531	0,0741	0,0903	0,1006	0,1049	0,1035	0,0962	0,0845	0,0682	0,0492
7	0,0329	0,0583	0,0818	0,0993	0,1107	0,1164	0,1154	0,1089	0,0974	0,0816	0,0632
5	0,0358	0,0638	0,0889	0,1081	0,1210	0,1271	0,1277	0,1222	0,1124	0,0982	0,0806
3	0,0401	0,0719	0,0996	0,1216	0,1370	0,1457	0,1487	0,1470	0,1401	0,1316	0,1195
2	—	0,0770	0,1077	0,1320	0,1494	0,1610	0,1675	0,1693	0,1685	0,1653	0,1609
1	—	0,0841	0,1187	0,1470	0,1691	0,1867	0,2008	0,2128	0,2228	0,2326	0,2440
0,5	—	0,0860	0,1240	0,1563	0,1841	0,2092	0,2324	0,2550	0,2778	0,3014	0,3270

Продолжение табл. 1

ρ_0/s (0)	a/s (0)										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0{,}5,\ k = 0$						
10	0,0243	0,033	0,04126	0,0478	0,05218	0,0540	0,0535	0,0508	0,0463	0,0400	0,0331
7	0,0283	0,0385	0,0484	0,0561	0,0613	0,0639	0,0638	0,0613	0,0565	0,0502	0,0431
5	0,0322	0,0443	0,0558	0,0649	0,07136	0,0746	0,0751	0,0730	0,0688	0,0629	0,0559
3	0,0383	0,0535	0,06798	0,0798	0,08836	0,0934	0,0956	0,0954	0,0928	0,0896	0,0851
2	—	0,0606	0,0781	0,0923	0,10308	0,1103	0,1149	0,1171	0,1180	0,1180	0,1181
1	—	0,0714	0,0943	0,1135	0,12908	0,1415	0,1521	0,1614	0,1702	0,1795	0,1910
0,5	—	0,0776	0,1063	0,1309	0,15228	0,1715	0,1897	0,2080	0,2272	0,2480	0,2712
					$n = 0{,}1,\ k = 0{,}1$						
10	0,0330	0,0525	0,0841	0,1187	0,1473	0,1663	0,1742	0,1710	0,1576	0,1350	0,1056
7	0,03436	0,0541	0,9862	0,1213	0,1505	0,1700	0,1788	0,1770	0,1654	0,1449	0,1176
5	0,0352	0,0552	0,0877	0,1232	0,1527	0,1729	0,1828	0,1828	0,1735	0,1564	0,1320
3	0,0356	0,0558	0,0884	0,1241	0,1542	0,1756	0,1878	0,1917	0,1878	0,1777	0,1608
2	0,0343	0,0544	0,0871	0,1227	0,1531	0,1758	0,1908	0,1990	0,2010	0,1976	0,1897
1	0,0269	0,0468	0,0793	0,1147	0,1462	0,1724	0,194	0,2116	0,2260	0,2376	0,2472
0,5	0,0144	0,0333	0,0654	0,1008	0,1346	0,1661	0,1958	0,2240	0,2512	0,2776	0,3036
					$n = 0{,}2,\ k = 0{,}1$						
10	0,0313	0,0451	—	0,0893	0,1085	0,1213	0,1268	0,1249	—	—	0,0822
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0,0345	0,0496	—	0,0980	0,1197	0,1345	0,1419	0,1423	—	—	0,1077
3	0,0354	0,0514	—	0,1033	0,1261	0,1427	0,1525	0,1560	—	—	0,1352
2	0,0340	0,0512	—	0,1052	0,1293	0,1477	0,1601	0,1672	—	—	0,1630
1	0,0275	0,4530	—	0,1028	0,1296	0,1521	0,1710	0,1866	—	—	0,2192
0,5	0,0150	0,0270	—	0,0939	0,1242	0,1526	0,1793	0,2046	—	—	0,2762

Продолжение табл. 1

ρ_0/s (0)	a/s (0)										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0{,}3,\ k = 0{,}1$						
10	0,0285	0,0381	0,0522	0,0674	0,0801	0,0886	0,0924	0,0914	0,0858	0,0764	0,0641
7	0,0308	0,0413	0,0567	0,0733	0,0873	0,0969	0,1014	0,1011	0,0962	0,0872	0,0751
5	0,0327	0,0440	0,0608	0,0788	0,0940	0,1047	0,1103	0,1110	0,1071	0,0993	0,0882
3	0,0345	0,0471	0,0659	0,0861	0,1034	0,1161	0,1239	0,1272	0,1263	0,1218	0,1143
2	0,0340	0,0479	0,0683	0,0903	0,1094	0,1241	0,1345	0,1408	0,1437	0,1434	0,1408
1	0,0279	0,0437	0,0671	0,0923	0,1150	0,1344	0,1509	0,1648	0,1765	0,1866	0,1956
0,5	0,0157	0,0327	0,05906	0,0875	0,1147	0,1404	0,1645	0,1872	0,2092	0,2308	0,2526
					$n = 0{,}5,\ k = 0{,}1$						
10	0,0219	0,0263	0,0322	0,0384	0,0437	0,0474	0,0492	0,04908	0,0470	0,0435	0,0390
7	0,0250	0,0301	0,0372	0,0446	0,0509	0,0554	0,0577	0,05808	0,0563	0,0530	0,0483
5	0,0278	0,0338	0,0420	0,0507	0,0581	0,0636	0,0667	0,06778	0,0666	0,0638	0,0596
3	0,0311	0,0387	0,0491	0,0601	0,0696	0,0770	0,0820	0,08486	0,0856	0,0847	0,0824
2	0,0321	0,0413	0,0537	0,0668	0,0784	0,0878	0,0950	0,1002	0,1037	0,1056	0,1064
1	0,0280	0,0404	0,0570	0,0745	0,0907	0,1051	0,1179	0,1293	0,1395	0,1491	0,1583
0,5	0,0169	0,0320	0,0533	0,0761	0,0981	0,1191	0,1390	0,1581	0,1768	0,1957	0,2154
					$n = 0{,}1,\ k = -0{,}1$						
10	0,0862	0,1210	0,1506	0,1710	0,1810	0,1802	0,1693	0,1492	0,1216	0,0899	0,0591
7	0,0893	0,1248	0,1553	0,1769	0,1886	0,1899	0,1817	0,1647	0,1402	0,1104	0,0788
5	0,0922	0,1281	0,1595	0,1825	0,1962	0,2004	0,1956	0,1827	0,1626	0,1368	0,1073
3	0,0960	0,1325	0,1653	0,1911	0,2088	0,2186	0,2210	0,2168	0,2064	0,1909	0,1709
2	0,0981	0,1349	0,1692	0,1977	0,2198	0,2352	0,2448	0,249	0,2484	0,2438	0,2356
1	0,0979	0,1358	0,1738	0,2086	0,2392	0,2658	0,2890	0,309	0,3266	0,3420	0,3556
0,5	0,0913	0,1321	0,1755	0,2176	0,2574	0,2948	0,3302	0,364	0,3966	0,4286	0,4600

Продолжение табл. 1

ρ_0/s (0)	a/s (0) 0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0,2$, $k = -0,1$						
10	0,0682	0,0914	—	0,1251	0,1320	0,1317	0,1247	0,1115	—	—	0,0521
5	0,0773	0,1031	—	0,1426	0,1528	0,1562	0,1533	0,1446	—	—	0,0920
3	0,0837	0,1114	—	0,1563	0,1703	0,1783	0,1809	—	—	—	0,1472
2	0,0880	0,1172	—	0,1675	0,1855	0,1984	0,2068	0,2110	—	—	0,2048
1	0,0920	0,1243	—	0,1864	0,2130	0,2360	0,2562	0,2740	—	—	0,3178
0,5	0,0896	0,1265	—	0,2034	0,2722	0,2722	0,3036	0,3338	—	—	0,4220
					$n = 0,3$, $k = -0,1$						
10	0,0539	0,0693	0,0824	0,0917	0,0964	0,0964	0,0920	0,0836	0,0721	0,0586	0,0451
7	0,0594	0,0763	0,0908	0,1016	0,1075	0,1087	0,1054	0,0980	0,0872	0,0740	0,0596
5	0,0648	0,0832	0,0993	0,1116	0,1191	0,1220	0,1204	0,1149	0,1058	0,0940	0,0801
3	0,0731	0,0939	0,1128	0,1281	0,1391	0,1457	0,1483	0,1474	0,1434	0,1366	0,1275
2	0,0791	0,1020	0,1236	0,1421	0,1568	0,1677	0,1752	0,1795	0,1814	0,1813	0,1792
1	0,0865	0,1139	0,1413	0,1668	0,1896	0,2098	0,2276	0,2436	0,2584	0,2722	0,2858
0,5	0,0879	0,1213	0,1562	0,1901	0,0964	0,2516	0,2800	0,3072	0,3344	0,3616	0,3892
					$n = 0,5$, $k = -0,1$						
10	0,0335	0,0398	0,0453	0,0493	0,0514	0,0517	0,0503	0,0473	0,0430	0,0379	0,0325
7	0,0393	0,0468	0,0535	0,0584	0,0614	0,0624	0,0615	0,0589	0,0549	0,0498	0,0438
5	0,0454	0,0542	0,0622	0,0684	0,0725	0,0746	0,0746	0,0730	0,0698	0,0653	0,0596
3	0,0555	0,0668	0,0773	0,0861	0,0928	0,0975	0,1003	0,1014	0,1011	0,0995	0,0968
2	0,0638	0,0775	0,0907	0,1023	0,1121	0,1201	0,1263	0,1311	0,1347	0,1375	0,1395
1	0,0765	0,0957	0,1152	0,1337	0,1507	0,1664	0,1808	0,1944	0,2078	0,2212	0,2350
0,5	0,0847	0,1115	0,1394	0,1664	0,1920	0,2164	0,2398	0,2630	0,2866	0,3112	0,3368

Примечание. A, n — константы степенной кривой упрочнения металла; k — коэффициент осевого нагружения; $k = \varepsilon_z/\chi = \text{const}$, где $\varepsilon_z = \ln B/B$ (0), $\chi = 1/\rho_{\text{ц}}$ ($\varepsilon_\theta = 0$).

Если s (0)/$\rho_0 \leqslant 0,1$, то вместо логарифмической может быть принята относительная мера деформации, тогда

$$M_z (B = 1) = 2\sigma_{\text{т0}} (s - a)\, a/\sqrt{3} + \\ + \Pi s^3/[9 (\rho_0 + a)] \qquad (11)$$

или

$$M_z (B = 1) = A (2/\sqrt{3})^{n+1} \times \\ \times (\rho_0 + a)^{-n} \{[a^{n+2} + (s-a)^{n+2}]/(n+2) + \\ + (s - 2a)[a^{n+1} - (s-a)^{n+1}]/[2(n+1)]\}. \qquad (12)$$

В формулах (10)—(12)

$$s = \sqrt{2s (0) (\rho_0 + a) - \rho_0^2} - \rho_0. \qquad (13)$$

Причем, если $a = s/2$, то $s = s$ (0), $\rho_0 + a = \rho_{\text{ц}}$ и формулы (10)—(12) принимают следующий вид:

$$M_z (B = 1) = \sigma_{\text{т0}} s^2/2\sqrt{3} + \\ + 2\Pi \{\rho_{\text{ц}} s - (\rho_{\text{ц}}^2 - s^2/4) \times \\ \times \ln [(2\rho_{\text{ц}} + s)/(2\rho_{\text{ц}} - s)]\} \qquad (14)$$

$$M_z (B = 1) = \sigma_{\text{т0}} s^2/2\sqrt{3} + \\ + \Pi s^3/(9\rho_{\text{ц}}); \qquad (15)$$

$$M_z (B = 1) = \\ = As^2 (s/\rho_{\text{ц}})^n/[(n+2)\, 3^{(n+1)/2}]. \qquad (16)$$

Область сечения, находящаяся в упругом состоянии, оказывает заметное влияние на M_z только при относительно малой кривизне гибки. Так, при $\sigma_{\text{т0}} = 200$ МПа; ρ ($\varepsilon_\theta = 0$) = $\rho_{\text{ц}}$; $s/\rho_{\text{ц}} = 0,01$ погрешность вычисления M_z по формуле (15) составляет не более 1 %, а при $s/\rho_{\text{ц}} = 0,005$ — до 4 %. Для вычисления изгибающего момента с учетом области сечения, находящейся в упругом состоянии, формула (15) принимает вид

$$M_z (B = 1) = \sigma_{\text{т0}} s^2/2\sqrt{3} + \\ + \Pi s^3/(9\rho_{\text{ц}}) - \sigma_{\text{т0}}^3 \rho_{\text{ц}}^2 (1 - \\ - 2\Pi/E)/(2\sqrt{3}E^2). \qquad (17)$$

Здесь $a = s/2$, $s = s$ (0), $B = B$ (0).

На рис. 4 представлена кривая *1*, построенная по данным табл. 1, и кривые *2—4*, построенные по формулам (10)—(12) соответственно. Между константами кривых упрочнения металла приняты следующие соотношения:

Рис. 4. Зависимость изгибающего момента от кривизны при a/s (0) = 0,2; $B = B$ (0); $n = 0,2$:

1 — по данным табл. 1; *2—4* — по формулам (10)—(12) соответственно

$$\sigma_{\text{т0}} = 0,7\sigma_{\text{в}};\ A = \sigma_{\text{в}}\, (\mathbf{e}/n)^n; \\ \sigma_{\text{ви}} = \sigma_{\text{в}} \mathbf{e}^n;\ \Pi = (\sigma_{\text{ви}} - \sigma_{\text{т0}})/n. \qquad (18)$$

Из сравнения кривых видно, что в области большой относительной кривизны изгиба вычисления по формулам (10)—(12) дают значительную погрешность.

Тангенциальная (продольная) сила. Тангенциальная сила, приходящаяся на единицу размера B (0),

$$P_\theta (B = 1) = (\exp \varepsilon_z) \int_{\rho_0}^{\rho_k} \sigma_\theta\, d\rho. \qquad (19)$$

В табл. 2 приведены значения безразмерной тангенциальной силы $p_\theta = P_\theta/[As\ (0)\ B\ (0)]$, найденные по формуле (19). Так же как и для изгибающего момента, при указанной выше относительно небольшой кривизне изгиба и при $B = B$ (0) для вычисления тангенциальной силы могут быть использованы приближенные формулы:

$$P_\theta (B = 1) = 2\sigma_{\text{т0}} (s - 2a)/\sqrt{3} + \\ + 4\Pi \{s \ln [(\rho_0 + s)/\mathbf{e}\, (\rho_0 + a)] + \\ + \rho_0 \ln (\rho_0 + s)/\rho_0\}/3; \qquad (20)$$

$$P_\theta (B = 1) = 2 (s - 2a) [\sigma_{\text{т0}}/\sqrt{3} + \\ + \Pi s/(3 (\rho_0 + a))]; \qquad (21)$$

$$P_\theta (B = 1) = \\ = A 2^{n+1} [(s-a)^{n+1} - a^{n+1}]/3^{(n+1)/2} \times \\ \times (n+1) (\rho_0 + a)^n, \qquad (22)$$

где размер s вычисляют по формуле (13).

2. Безразмерная сила $p_\theta = P_\theta/[As(0)\,B(0)]$

$\rho_\theta/s(0)$	$a/s(0)$										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0,1,\ k = 0$						
10	0,7624	0,6150	0,4594	0,3008	0,1437	—0,0077	—0,1739	—0,3404	—0,4932	—0,6488	—0,7964
7	0,7596	0,6114	0,4486	0,2954	0,1447	—0,0079	—0,1777	—0,3434	—0,5044	—0,6596	—0,8074
5	0,7480	0,5942	0,4378	0,2852	0,1349	—0,0153	—0,1839	—0,3538	—0,5086	—0,6632	—0,8166
3	0,7104	0,5602	0,4076	0,2586	0,1154	—0,0169	—0,1957	—0,3536	—0,5198	—0,6624	—0,8116
2	—	0,5144	0,3672	0,2272	0,10112	—0,0270	—0,1963	—0,3634	—0,5134	—0,6586	—0,7986
1	—	0,4062	0,2758	0,1601	0,06162	—0,0430	—0,2160	—0,3708	—0,5234	—0,6620	—0,7846
0,5	—	0,2846	0,1810	0,0978	0,03116	—0,0866	—0,2436	—0,3870	—0,5254	—0,6566	—0,7782
					$n = 0,2,\ k = 0$						
10	0,5582	—	0,3400	0,2230	0,1058	—0,0093	—0,1349	—	—0,3764	—	—0,6014
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0,5824	—	0,3458	0,2240	0,1030	—0,0195	—0,1571	—	—0,4218	—	—0,6690
3	0,5780	—	0,3340	0,2106	0,0890	—0,0278	—0,1799	—	—0,4590	—	—0,7096
2	—	—	0,3104	0,1358	0,1054	—0,0429	—0,1949	—	—0,4804	—	—0,7368
1	—	—	0,2428	0,0797	0,0423	—0,0762	—0,2416	—	—0,5392	—	—0,7944
0,5	—	—	0,1622	0,0798	0,0123	—0,1445	—0,3076	—	—0,6028	—	—0,8678
					$n = 0,3,\ k = 0$						
10	0,4112	0,3358	0,2524	0,1658	0,0783	—0,0087	—0,1034	—0,1974	—0,2829	—0,3730	—0,4540
7	0,4370	0,3560	0,2650	0,1732	0,0814	—0,0124	—0,1163	—0,2182	—0,3168	—0,4114	—0,4998
5	0,4564	0,3690	0,2736	0,1767	0,0797	—0,0197	—0,1315	—0,2428	—0,3408	—0,4484	—0,5466
3	0,4712	0,3776	0,2754	0,1726	0,0712	—0,0317	—0,1608	—0,2796	—0,4006	—0,5082	—0,6166
2	—	0,3690	0,2636	0,1592	0,0608	—0,0501	—0,1858	—0,3197	—0,4422	—0,5604	—0,6734
1	—	0,3208	0,2152	0,1168	0,0289	—0,0966	—0,2540	—0,3990	—0,5412	—0,6726	—0,7910
0,5	—	0,2426	0,1469	0,0659	—0,0017	—0,1871	—0,3550	—0,5112	—0,6620	—0,8054	—0,9394

Продолжение табл 2

$\rho_\theta/s(0)$	$a/s(0)$										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0,5,\ k = 0$						
10	0,2270	0,1857	0,1398	0,0920	0,0433	—0,0060	—0,0595	—0,1126	—0,1635	—0,2132	—0,2596
7	0,2574	0,2100	0,1571	0,1026	0,0473	—0,0095	—0,0727	—0,1349	—0,1956	—0,2540	—0,3088
5	0,2850	0,2314	0,1721	0,1108	0,0489	—0,0156	—0,0888	—0,1615	—0,2308	—0,2984	—0,3634
3	0,3200	0,2576	0,1884	0,1174	0,0463	—0,0297	—0,1222	—0,2100	—0,2984	—0,3798	—0,4606
2	—	0,2678	0,1917	0,1145	0,0394	—0,0504	—0,1573	—0,2630	—0,3628	—0,4596	—0,5526
1	—	0,2564	0,1714	0,0892	0,0128	—0,1128	—0,2538	—0,3874	—0,5190	—0,6434	—0,7582
0,5	—	0,2096	0,1234	0,0450	—0,0556	—0,2390	—0,4130	—0,5784	—0,7394	—0,8944	—1,0416
					$n = 0,1,\ k = 0,1$						
10	0,7074	0,6448	0,5418	0,4114	0,2698	0,1247	—0,0217	—0,1789	—0,3320	—0,4792	—0,6174
7	0,6962	0,6346	0,5312	0,4002	0,2588	0,1150	—0,0312	—0,1909	—0,3462	—0,4956	—0,6366
5	0,6748	0,6148	0,5116	0,3816	0,2422	0,1016	—0,0436	—0,2050	—0,3612	—0,5114	—0,6542
3	0,6186	0,5626	0,4624	0,3364	0,2038	0,0730	—0,0704	—0,2322	—0,3878	—0,5372	—0,6800
2	0,5530	0,5022	0,4060	0,2862	0,1630	0,0445	—0,1003	—0,2600	—0,4132	—0,5602	—0,7012
1	0,4074	0,3688	0,2834	0,1812	0,0830	—0,0125	—0,1715	—0,3238	—0,4698	—0,6104	—0,7454
0,5	0,2494	0,2264	0,1567	0,0804	0,0140	—0,1178	—0,2664	—0,4096	—0,5480	—0,6816	—0,8108
					$n = 0,2,\ k = 0,1$						
10	0,5385	0,4858	—	0,3084	0,2024	0,0935	—0,0168	—0,1354	—	—	—0,4672
5	0,5472	0,4932	—	0,3048	0,1935	0,0809	—0,0363	—0,1667	—	—	—0,5320
3	0,5242	0,4714	—	0,2808	0,1702	0,0603	—0,0615	—0,1992	—	—	—0,5838
2	0,4846	0,4346	—	0,2468	0,1405	0,0371	—0,0912	—0,2330	—	—	—0,6294
1	0,3764	0,3358	—	0,1646	0,0746	—0,0164	—0,1670	—0,3130	—	—	—0,7238
0,5	0,2422	0,2156	—	0,0763	0,0115	—0,1251	—0,2778	—0,4276	—	—	—0,8522

Продолжение табл. 2

ρ_0/s (0)	a/s (0)										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0{,}3,\ k = 0{,}1$						
10	0,4108	0,3633	0,3052	0,2314	0,1518	0,0700	—0,0131	—0,1025	—0,1899	—0,2744	—0,3540
7	0,4318	0,3852	0,3194	0,2404	0,1557	0,0688	—0,0202	—0,1178	—0,2130	—0,3052	—0,3928
5	0,4446	0,3962	0,3268	0,2436	0,1547	0,0644	—0,0301	—0,1355	—0,2382	—0,3376	—0,4328
3	0,4450	0,3956	0,3222	0,2344	0,1422	0,0498	—0,0535	—0,1706	—0,2844	—0,3948	—0,5010
2	0,4250	0,3766	0,3020	0,2130	0,1212	0,0311	—0,0825	—0,2082	—0,3304	—0,4490	—0,5638
1	0,3482	0,3060	0,2334	0,1496	0,0673	—0,0192	—0,1612	—0,3004	—0,4366	—0,5696	—0,6988
0,5	0,2354	0,2054	0,1415	0,0725	0,0946	—0,1302	—0,2858	—0,4400	—0,5918	—0,7402	—0,8846
					$n = 0{,}5,\ k = 0{,}1$						
10	0,2404	0,2100	0,1729	0,1306	0,0856	0,0394	—0,0077	—0,0587	—0,1086	—0,1573	—0,2038
7	0,2698	0,2356	0,1932	0,1449	0,0938	0,0413	—0,0128	—0,0724	—0,1309	—0,1881	—0,2432
5	0,2948	0,2572	0,2098	0,1560	0,0990	0,0409	—0,0204	—0,0891	—0,1567	—0,2228	—0,2868
3	0,3220	0,2798	0,2256	0,1638	0,0992	0,0341	—0,0399	—0,1244	—0,2074	—0,2890	—0,3686
2	0,3284	0,2840	0,2254	0,1589	0,0902	0,0220	—0,0664	—0,1645	—0,2616	—0,3570	—0,4508
1	0,2986	0,2550	0,1928	0,1236	0,0547	—0,0220	—0,1468	—0,2720	—0,3970	—0,5208	—0,6430
0,5	0,2226	0,1870	0,1279	0,0654	0,0062	—0,1356	—0,2928	—0,4526	—0,6128	—0,7716	—0,9280
					$n = 0{,}1,\ k = -0{,}1$						
10	0,5572	0,4300	0,2914	0,1491	0,0065	—0,1479	—0,2998	—0,4468	—0,5864	—0,7140	—0,8226
7	0,5522	0,4258	0,2886	0,1484	0,0089	—0,1472	—0,3010	—0,4498	—0,5922	—0,7252	—0,8448
5	0,5394	0,4156	0,2818	0,1459	0,0115	—0,1446	—0,2992	—0,4488	—0,5926	—0,7292	—0,8564
3	0,5022	0,3862	0,2620	0,1374	0,0158	—0,1373	—0,2912	—0,4402	—0,5836	—0,7218	—0,8542
2	0,4556	0,3500	0,2374	0,1260	0,0183	—0,1269	—0,2810	—0,4284	—0,5704	—0,7072	—0,8396
1	0,3462	0,2664	0,1806	0,0970	0,0182	—0,1158	—0,2646	—0,4086	—0,5476	—0,6822	—0,8122
0,5	0,2202	0,1731	0,1168	0,0613	0,0101	—0,1194	—0,2672	—0,4104	—0,5490	—0,6834	—0,8136

Продолжение табл. 2

ρ_0/s (0)	a/s (0)										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0{,}2,\ k = -0{,}1$						
10	0,4184	0,3226	—	0,1112	0,0035	—0,1134	—0,2285	—0,3400	—	—	—0,6288
5	0,4320	0,3324	—	0,1154	0,0065	—0,1209	—0,2470	—0,3692	—	—	—0,7042
3	0,4208	0,3230	—	0,1126	0,0089	—0,1239	—0,2566	—	—	—	—0,7448
2	0,3950	0,3026	—	0,1057	0,0089	—0,1253	—0,2624	—0,3958	—	—	—0,7696
1	0,3170	0,2424	—	0,0829	0,0075	—0,1326	—0,2776	—0,4188	—	—	—0,8154
0,5	0,2122	0,1643	—	0,0510	—0,0045	—0,1635	—0,3192	—0,4706	—	—	—0,8968
					$n = 0{,}3,\ k = -0{,}1$						
10	0,3148	0,2422	0,1639	0,0831	0,0018	—0,0868	—0,1741	—0,2588	—0,3394	—0,4146	—0,4818
7	0,3336	0,2564	0,1734	0,0881	0,0025	—0,0941	—0,1892	—0,2816	—0,3704	—0,4544	—0,5322
5	0,3466	0,2662	0,1798	0,0914	0,0033	—0,1007	—0,2034	—0,3032	—0,3996	—0,4920	—0,5796
3	0,3530	0,2704	0,1820	0,0926	0,0042	—0,1108	—0,2250	—0,3360	—0,4438	—0,5482	—0,6492
2	0,3428	0,2618	0,1754	0,0888	0,0039	—0,1196	—0,2428	—0,3632	—0,4802	—0,5934	—0,7036
1	0,2906	0,2206	0,1455	0,0710	—0,0011	—0,1441	—0,2846	—0,4220	—0,5554	—0,6852	—0,8112
0,5	0,2046	0,1562	0,0992	0,0422	—0,0360	—0,2006	—0,3628	—0,5210	—0,6746	—0,8238	—0,9686
					$n = 0{,}5,\ k = -0{,}1$						
10	0,1789	0,1370	0,0924	0,0465	0,0001	—0,0507	—0,1008	—0,1498	—0,1971	—0,2422	—0,2842
7	0,2026	0,1550	0,1044	0,0524	0,0001	—0,0595	—0,1184	—0,1760	—0,2320	—0,2858	—0,3374
5	0,2238	0,1710	0,1149	0,0575	—0,0001	—0,0690	—0,1371	—0,2040	—0,2692	—0,3326	—0,3940
3	0,2494	0,1898	0,1268	0,0628	—0,0014	—0,0865	—0,1708	—0,2536	—0,3348	—0,4146	—0,4928
2	0,2592	0,1964	0,1301	0,0631	—0,0049	—0,1046	—0,2036	—0,3016	—0,3976	—0,4918	—0,5846
1	0,2448	0,1834	0,1179	0,0523	—0,0242	—0,1548	—0,2848	—0,4138	—0,5404	—0,6648	—0,7868
0,5	0,1907	0,1413	0,0848	0,0277	—0,0851	—0,2570	—0,4284	—0,5976	—0,7634	—0,9356	—1,0842

Примечание. Обозначения параметров — см. табл. 1.

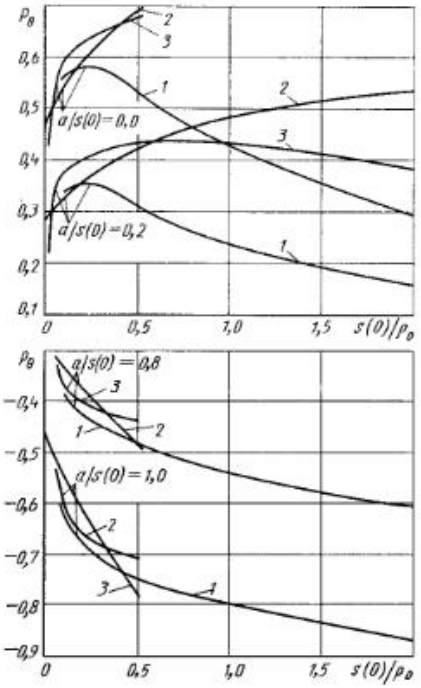


Рис. 5. Зависимость тангенциальной силы от кривизны при различных значениях параметра a/s (0) для $B = B$ (0); $n = 0{,}2$: *1* — по данным табл. 2; *2* — по формуле (20); *3* — по формуле (22)

На рис. 5 представлены кривые *1*, построенные по данным табл. 2, и для сравнения с ними кривые *2*, *3*, построенные соответственно по формулам (20) и (22) для различных значений a/s (0). Кривые *2* и *3* для значения a/s (0) $= 0{,}2$ продлены в область большой относительной кривизны, где они значительно уходят от кривой *1* (т. е. область применения формул (20) и (22) не может быть расширена дальше указанной).

В процессе изгиба заготовки при неизменной ширине $B = B$ (0) под воздействием только изгибающего момента M_z ее толщина s сокращается тем больше, чем больше заданная кривизна и показатель степени n кривой упрочнения металла (табл. 3). Соответственно сокращается и расстояние $a = \rho\,(\varepsilon_\theta = 0) - \rho_0$ (табл. 4). Если металл не упрочняется ($n = 0$), то толщина не меняется, т. е. $s = s$ (0), $a = s$ (0)/2 при изгибе до любой кривизны.

Давления на поверхностях радиусов ρ_0 и ρ_k. Давления σ_ρ $(\rho = \rho_0)$ и $\sigma_\rho (\rho = \rho_k)$ на граничных поверхностях и тангенциальная сила P_θ связаны следующим равенством:

$$\rho_k \sigma_\rho (\rho = \rho_k) - \rho_0 \sigma_\rho (\rho = \rho_0) = P_\theta. \quad (23)$$

Как правило, давление на одной из поверхностей равно нулю. Если, например, σ_ρ $(\rho = \rho_k) = 0$, то

$$-\rho_0\, \sigma_\rho\, (\rho = \rho_0) = P_\theta.$$

Осевая нагрузка. Осевая сила (см. рис. 3), приходящаяся на часть сечения заготовки плоскостью ρ, θ, лежащую в растворе единичного угла $\theta = 1$,

$$P_z (\theta = 1) = dP_z/d\theta = \int_{\rho_0}^{\rho_k} \sigma_z \rho\, d\rho, \quad (24)$$

на все сечения в растворе угла α

$$P_z = P_z\ (\theta = 1)\, \alpha, \quad (25)$$

на единицу длины $(L = L\,(0) = 1)$ дуги радиусом $\rho\ (\varepsilon_\theta = 0)$

$$P_z (L = 1) = P_z (\theta = 1)/\rho\ (\varepsilon_\theta = 0) = P_z (\theta = 1)\, \chi. \quad (26)$$

В табл. 5 приведены значения безразмерной осевой силы $p_z = P_z (\theta = 1)/[As^2\,(0)]$, найденные по формуле (24).

Согласно произведенным расчетам при $a = s$ (0)/2 и $B = B$ (0) сила $P_z \neq 0$. При гибке листовой заготовки к пластически деформируемому участку, лежащему в растворе угла α, обычно примыкают участки, находящиеся в упругом состоянии. Они и воспринимают эту осевую силу.

Изгибающий момент, приходящийся на часть сечения заготовки плоскостью ρ, θ, лежащую в растворе единичного угла $\theta = 1$,

$$M_\theta (\theta = 1) = dM_\theta/d\theta = \int_{\rho_0}^{\rho_k} \sigma_z\, (\rho - \rho_ц)\, \rho\, d\rho. \quad (27)$$

Момент берут относительно оси, перпендикулярной к плоскости z, ρ, проходящей через точку с координатой $\rho_ц = \rho_0 + s/2$. Чтобы момент M_θ и силу P_z привести к оси, проходящей через центр тяжести площадки, лежащей в растворе угла $d\theta$ и имеющей координату $\rho_ц^\theta$, момент необходимо умножить на дробь $\rho_ц^\theta/\rho_ц$. Причем силу P_z и момент M_θ принимают равномерно распределенными по дуге радиусом

$$\rho_ц^\theta = 2\left(\rho_k^3 - \rho_0^3\right)/3\left[\left(\rho_k^2 - \rho_0^2\right)\right].$$

Момент, приходящийся на все сечение в растворе угла α,

$$M_\theta = M_\theta (\theta = 1)\, \alpha, \quad (28)$$

на единицу длины $L = L\,(0) = 1$ дуги радиусом $\rho\ (\varepsilon_\theta = 0)$

$$M_\theta (L = 1) = M_\theta\ (\theta = 1)/\rho\ (\varepsilon_\theta = 0) = M_\theta (\theta = 1)\, \chi. \quad (29)$$

В табл. 6 приведены значения безразмерного момента $m_\theta = M_\theta\ (\theta = 1)/[As^3\,(0)]$, найденные по формуле (27).

Работа изгибающего момента, приходящаяся на единицу длины $L\,(0) = 1$, заготовки,

$$A\,(M_z) = \int_0^\chi M_z\, d\chi. \quad (30)$$

С помощью данных табл. 1 работу можно найти графически, как площадь под кривой $M_z\,(\chi)$. В случаях, когда применимы формулы (14)—(16), выражения для работы на единицу длины $(L\,(0) = 1)$ и единицу ширины

3. Безразмерная толщина s/s (0)

n	$s\,(0)/\rho_0$						
	2,0	1,0	0,5	0,33	0,2	0,14	0,1
0,1	0,9752	0,9794	0,9866	0,9887	0,9916	0,9938	0,9954
0,2	0,9692	0,9723	0,9778	0,9818	0,9866	0,9894	0,9927
0,3	0,9631	0,9642	0,9704	0,9757	0,9832	0,9877	0,9909
0,5	0,9472	0,9529	0,9622	0,9703	0,9798	0,9859	0,9881

4. Безразмерное расстояние a/s (0)

n	$s\,(0)/\rho_0$						
	2,0	1,0	0,5	0,33	0,2	0,14	0,1
0,1	0,4260	0,4590	0,4800	0,4850	0,4900	0,4930	0,4950
0,2	0,4080	0,4450	0,4670	0,4760	0,4840	0,4880	0,4920
0,3	0,3900	0,4290	0,4560	0,4680	0,4800	0,4860	0,4900
0,5	0,3430	0,4070	0,4440	0,4610	0,4760	0,4840	0,4870

5. Безразмерная сила $p_z = P_z\ (\theta = 1)/[As^2\ (0)]$

$\rho_0/s\ (0)$	$a/s\ (0)$										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0,1,\ k = 0$						
10	3,8120	3,0740	2,2960	1,5038	0,7186	—0,0423	—0,9574	—1,8754	—2,7180	—3,5800	—4,3980
7	2,6580	2,1400	1,5702	1,0342	0,5066	—0,0317	—0,7118	—1,3782	—2,0280	—2,6560	—3,2540
5	1,8698	1,4856	1,0946	0,7132	0,3372	—0,0459	—0,5534	—1,0674	—1,5386	—2,0120	—2,4840
3	1,0654	0,8404	0,6114	0,3880	0,1731	—0,0337	—0,3938	—0,7160	—1,0590	—1,3574	—1,6734
2	—	0,5144	0,3672	0,2272	0,1011	—0,0405	—0,2978	—0,5572	—0,7952	—1,0310	—1,2628
1	—	0,2030	0,1379	0,0800	0,0308	—0,0431	—0,2212	—0,3890	—0,5612	—0,7252	—0,8772
0,5	—	0,0712	0,0452	0,0245	0,0078	—0,0650	—0,1906	—0,3150	—0,4434	—0,5734	—0,7016
					$n = 0.2,\ k = 0$						
10	2,7900	1,7000	—	1,1150	0,5288	—0,0512	—0,7426	—	—0,2076	—	—3,3200
5	1,4558	0,8644	—	0,5600	0,2578	—0,0585	—0,4728	—	—1,2760	—	—2,0340
3	0,8650	0,5016	—	0,3158	0,1348	—0,0556	—0,3620	—	—0,9352	—	—1,4628
2	—	0,3104	—	0,0675	0,0776	—0,0644	—0,2956	—	—0,7442	—	—1,1648
1	—	0,1214	—	0,0199	0,0212	—0,0763	—0,2476	—	—0,5782	—	—0,8882
0,5	—	0,0405	—	0,0099	0,0031	—0,1084	—0,2408	—	—0,5088	—	—0,7822
					$n = 0,3,\ k = 0$						
10	2,0560	1,6790	1,2618	0,8288	0,3914	—0,0480	—0,5692	—1,0876	—1,5760	—2,0580	—2,5080
7	1,5298	1,2458	0,9272	0,6062	0,2848	—0,0494	—0,4660	—0,8754	—1,2734	—1,6560	—2,0140
5	1,1408	0,9226	0,6840	0,4416	0,1991	—0,0590	—0,3956	—0,7326	—1,0492	—1,3602	—1,6622
3	0,7068	0,5664	0,4132	0,2588	0,1068	—0,0634	—0,3236	—0,5662	—0,8162	—1,0416	—1,2712
2	—	0,3688	0,2636	0,1592	0,0608	—0,0751	—0,2818	—0,4896	—0,6850	—0,8772	—1,0648
1	—	0,1604	0,1076	0,0584	0,0144	—0,0966	—0,2602	—0,4186	—0,5804	—0,7368	—0,8844
0,5	—	0,0606	0,0367	0,0165	—0,0004	—0,1403	—0,2778	—0,4162	—0,5588	—0,7032	—0,8468

Продолжение табл. 5

$\rho_0/s\ (0)$	$a/s\ (0)$										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0,5,\ k = 0.0$						
10	1,1352	0,9282	0,6992	0,4602	0,2164	—0,0327	—0,3274	—0,6202	—0,9012	—1,1760	—1,4334
7	0,9008	0,7348	0,5500	0,3590	0,1655	—0,0382	—0,2914	—0,5414	—0,7858	—1,0220	—1,2446
5	0,7122	0,5784	0,4302	0,2772	0,1221	—0,0469	—0,2670	—0,4870	—0,6982	—0,9050	—1,1054
3	0,4798	0,3862	0,2826	0,1761	0,0695	—0,0594	—0,2460	—0,4254	—0,6080	—0,7782	—0,9494
2	—	0,2678	0,1917	0,1145	0,0394	—0,0756	—0,2384	—0,4032	—0,5620	—0,7192	—0,8736
1	—	0,1282	0,0857	0,0446	0,0064	—0,1128	—0,2600	—0,4064	—0,5566	—0,7046	—0,8478
0,5	—	0,0524	0,0308	0,0117	—0,0198	—0,1793	—0,3232	—0,4708	—0,6242	—0,7810	—0,9388
					$n = 0,1,\ k = 0,1$						
10	6,2420	6,4520	6,4440	6,1580	5,6780	5,0800	4,3840	3,4960	2,5600	1,5784	0,5562
7	4,4380	4,6040	4,6120	4,4180	4,0900	3,6600	3,1880	2,5380	1,8588	1,1522	0,4228
5	3,2000	3,3360	3,3540	3,2240	2,9980	2,7160	2,3620	1,8764	1,3728	0,8552	0,3256
3	1,9310	2,0340	2,0600	1,9958	1,8756	1,7264	1,5020	1,1856	0,8640	0,5384	0,2110
2	1,2838	1,3676	1,3986	1,3674	1,3014	1,2196	1,0498	0,8228	0,5938	0,3642	0,1355
1	0,6290	0,6954	0,7308	0,7346	0,7240	0,7002	0,5490	0,4340	0,2966	0,1577	0,0185
0,5	0,2916	0,3548	0,3972	0,4224	0,4406	0,3862	0,3020	0,2104	0,1131	0,0111	—0,0949
					$n = 0,2,\ k = 0,1$						
10	4,7040	4,7760	—	4,4460	4,0640	3,6000	3,0680	2,3980	—	—	0,2276
5	2,5740	2,6340	—	2,4820	2,2860	2,2500	1,7578	1,3622	—	—	0,1236
3	1,6252	1,6798	—	1,6052	1,4936	1,3598	1,1624	0,8898	—	—	0,0610
2	1,1190	1,1686	—	1,1368	1,0702	0,9912	0,8336	0,6280	—	—	0,0111
1	0,5808	0,6280	—	0,6428	0,6252	0,5928	0,4622	0,3274	—	—	—0,0845
0,5	0,2842	0,3368	—	0,3856	0,3960	0,3298	0,2360	0,1340	—	—	—0,2008

Продолжение табл. 5

ρ_0/s (0)	a/s (0)										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0{,}3,\ k = 0{,}1$						
10	3,5540	3,5440	3,4400	3,2200	2,9140	2,5560	2,1500	1,6448	1,1214	0,5842	0,0390
7	2,7020	2,7040	2,6320	2,4680	2,2420	1,9762	1,6676	1,2684	0,8580	0,4394	0,0179
5	2,0740	2,0840	2,0340	1,9140	1,7460	1,5494	1,3088	0,9876	0,6598	0,3288	—0,0026
3	1,3702	1,3892	1,3658	1,2938	1,1914	1,0724	0,9000	0,6660	0,4298	0,1942	—0,0388
2	0,9768	1,0006	0,9916	0,9468	0,8814	0,8066	0,6618	0,4768	0,2908	0,1061	—0,0756
1	0,5366	0,5678	0,5762	0,5632	0,5406	0,5022	0,3742	0,2418	0,1070	—0,0284	—0,1632
0,5	0,2770	0,3200	0,3434	0,3526	0,3562	0,2808	0,1796	0,0598	—0,0462	—0,1665	—0,2900
					$n = 0{,}5,\ k = 0{,}1$						
10	2,0400	1,9684	1,8566	1,6994	1,5082	1,2946	1,0696	0,7726	0,4798	0,1839	—1,1115
7	1,6584	1,6042	1,5168	1,3916	1,2390	1,0684	0,8758	0,6318	0,3842	0,1350	—0,1124
5	1,3532	1,3136	1,2458	1,1462	1,0242	0,8890	0,7276	0,5172	0,3044	0,0917	—0,1186
3	0,9788	0,9574	0,9136	0,8454	0,7620	0,6700	0,5406	0,3694	0,1977	0,0272	—0,1404
2	0,7476	0,7378	0,7088	0,6604	0,6008	0,5364	0,4172	0,2692	0,1207	—0,0268	—0,1718
1	0,4598	0,4664	0,4572	0,4344	0,4058	0,3610	0,2420	0,1180	0,0900	—0,1373	—0,2656
0,5	0,2640	0,2896	0,2982	0,2958	0,2892	0,2016	0,0911	0,0293	—0,1571	—0,2900	—0,4270
					$n = 0{,}1,\ k = -0{,}1$						
10	—1,0158	—2,0180	—2,9460	—3,7940	—4,5660	—5,4060	—6,1720	—6,8440	—7,3980	—7,7900	—7,9760
7	—0,8922	—1,6008	—2,2560	—2,8440	—3,3820	—4,0060	—4,5880	—5,1080	—5,5580	—5,9180	—6,1600
5	—0,8046	—1,3102	—1,7730	—2,1900	—2,5680	—3,0440	—3,4960	—3,9120	—4,2860	—4,6120	—4,8760
3	—0,7040	—1,0020	—1,2716	—1,5120	—1,7274	—2,0460	—2,3680	—2,6720	—2,9600	—3,2300	—3,4840
2	—0,6420	—0,8340	—1,0060	—1,1586	—1,2946	—1,5310	—1,7834	—2,0280	—2,2680	—2,5000	—2,7260
1	—0,5558	—0,6430	—0,7214	—0,7906	—0,8530	—1,0048	—1,1868	—1,3702	—1,5540	—1,7392	—1,9250
0,5	—0,4944	—0,5322	—0,5684	—0,6014	—0,6320	—0,7500	—0,8962	—1,0470	—1,2016	—1,3594	—1,5200

Продолжение табл. 5

ρ_0/s (0)	a/s (0)										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0{,}2,\ k = -0{,}1$						
10	—0,6316	—1,3464	—	—2,6400	—3,2180	—3,8520	—4,4400	—4,9640	—	—	—5,9680
5	—0,5738	—0,9554	—	—1,6364	—1,9346	—2,3220	—2,6920	—3,0380	—	—	—3,8840
3	—0,5468	—0,7796	—	—1,1882	—1,3654	—1,6412	—1,9164	—	—	—	—2,9100
2	—0,5280	—0,6812	—	—0,9466	—1,0612	—1,2770	—1,5020	—1,7238	—	—	—2,3700
1	—0,4966	—0,5660	—	—0,6868	—0,7398	—0,8976	—1,0716	—1,2488	—	—	—1,7952
0,5	—0,4724	—0,4984	—	—0,5494	—0,5770	—0,7194	—0,8698	—1,0264	—	—	—1,5246
					$n = 0{,}3,\ k = -0{,}1$						
10	—0,3832	—0,8942	—1,3816	—1,8406	—2,2700	—2,7520	—3,2020	—3,6100	—3,9700	—4,2600	—4,4800
7	—0,3948	—0,7784	—1,1426	—1,4838	—1,8018	—2,1880	—2,5520	—2,8900	—3,1980	—3,4680	—3,6800
5	—0,4074	—0,6960	—0,9688	—1,2232	—1,4598	—1,7746	—2,0780	—2,3640	—2,6340	—2,8820	—3,1040
3	—0,4248	—0,6070	—0,7772	—0,9348	—1,0806	—1,3182	—1,5544	—1,7844	—2,0080	—2,2280	—2,4400
2	—0,4354	—0,5572	—0,6704	—0,7744	—0,8710	—1,0670	—1,2676	—1,4680	—1,6674	—1,8664	—2,0660
1	—0,4444	—0,4990	—0,5500	—0,5972	—0,6430	—0,8032	—0,9690	—1,1400	—1,3148	—1,4940	—1,6762
0,5	—0,4516	—0,4672	—0,4846	—0,5024	—0,5468	—0,6904	—0,8440	—1,0058	—1,1742	—1,3482	—1,5270
					$n = 0{,}5,\ k = -0{,}1$						
10	—0,1244	—0,3878	—0,6458	—0,8950	—1,1338	—1,4104	—1,6750	—1,9248	—2,1560	—2,3660	—2,5460
7	—0,1641	—0,3740	—0,5788	—0,7762	—0,9652	—1,2030	—1,4324	—1,6526	—1,8622	—2,0580	—2,2380
5	—0,2016	—0,3680	—0,5296	—0,6852	—0,8342	—1,0422	—1,2454	—1,4436	—1,6362	—1,8228	—2,0020
3	—0,2566	—0,3684	—0,4766	—0,5800	—0,6808	—0,8552	—1,0294	—1,2036	—1,3780	—1,5530	—1,7282
2	—0,2972	—0,3742	—0,4484	—0,5196	—0,5930	—0,7490	—0,9084	—1,0718	—1,2380	—1,4074	—1,5804
1	—0,3576	—0,3892	—0,4212	—0,4530	—0,5048	—0,6460	—0,7960	—0,9542	—1,1190	—1,2904	—1,4672
0,5	—0,4142	—0,4116	—0,4146	—0,4212	—0,4920	—0,6366	—0,7950	—0,9648	—1,1442	—1,3320	—1,5268

Примечание. Обозначение параметров см. табл. 1.

6. Безразмерный момент $m_\theta = M_\theta(\theta = 1)/[As^3(0)]$

$\rho_0/s(0)$	$d/s(0)$										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0,1,\ k = 0$						
10	0,1852	0,4862	0,7378	0,9240	1,0374	1,0782	1,0504	0,9518	0,8014	0,5840	0,3194
7	0,1539	0,3680	0,5542	0,6824	0,7630	0,7962	0,7800	0,7176	0,6122	0,4678	0,2916
5	0,1299	0,2902	0,4204	0,5152	0,5756	0,6014	0,5926	0,5504	0,4844	0,3894	0,2660
3	0,0998	0,1975	0,2786	0,3394	0,3794	0,3994	0,3972	0,3804	0,3440	0,3014	0,2402
2	—	0,1467	0,2032	0,2462	0,2758	0,2932	0,2958	0,2874	0,2720	0,2486	0,2184
1	—	0,0873	0,1193	0,1454	0,1664	0,1816	0,1863	0,1874	0,1838	0,1781	0,1723
0,5	—	0,0502	0,0709	0,0899	0,1077	0,1197	0,1252	0,1288	0,1301	0,1297	0,1285
					$n = 0,3,\ k = 0$						
10	0,1871	0,3026	0,4064	0,4850	0,5334	0,5502	0,5358	0,4906	0,4218	0,3276	0,2194
7	0,1544	0,2430	0,3240	0,3834	0,4204	0,4342	0,4242	0,3922	0,3404	0,2722	0,1935
5	0,1293	0,1993	0,2616	0,3080	0,3374	0,3486	0,3418	0,3178	0,2818	0,2328	0,1733
3	0,0984	0,1466	0,1895	0,2222	0,2432	0,2524	0,2484	0,2360	0,2128	0,1869	0,1531
2	—	0,1147	0,1471	0,1721	0,1889	0,1968	0,1953	0,1867	0,1740	0,1572	0,1378
1	—	0,0735	0,0949	0,1122	0,1254	0,1313	0,1304	0,1263	0,1190	0,1104	0,1026
0,5	—	0,0452	0,0609	0,0747	0,0870	0,0877	0,0856	0,0812	0,0744	0,0660	0,0572
					$n = 0,5,\ k = 0$						
10	0,1444	0,1867	0,2266	0,2572	0,2764	0,2828	0,2766	0,2580	0,2298	0,1924	0,1512
7	0,1241	0,1591	0,1923	0,2174	0,2332	0,2388	0,2338	0,2192	0,1963	0,1668	0,1344
5	0,1075	0,1371	0,1647	0,1858	0,1991	0,2038	0,1999	0,1870	0,1703	0,1474	0,1209
3	0,0857	0,1087	0,1300	0,1464	0,1570	0,1610	0,1579	0,1501	0,1371	0,1229	0,1056
2	—	0,0896	0,1073	0,1211	0,1303	0,1337	0,1312	0,1246	0,1157	0,1049	0,0933
1	—	0,0621	0,0760	0,0871	0,0953	0,0964	0,0929	0,0870	0,0786	0,0695	0,0611
0,5	—	0,0408	0,0526	0,0626	0,0685	0,0650	0,0583	0,0486	0,0369	0,0232	0,0089

Продолжение табл. 6

$\rho_0/s(0)$	$d/s(0)$										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0,1,\ k = 0,1$						
10	−0,0471	−0,0487	0,0527	0,2604	0,5114	0,7552	0,9614	1,1104	1,1902	1,1902	1,1030
7	−0,0044	−0,0044	0,0688	0,2174	0,3964	0,5700	0,7174	0,8254	0,8872	0,8964	0,8490
5	0,0213	0,2300	0,0771	0,1857	0,3156	0,4412	0,5486	0,6284	0,6776	0,6928	0,6714
3	0,0395	0,0437	0,0794	0,1474	0,2274	0,3050	0,3716	0,4226	0,4584	0,4776	0,4804
2	0,0413	0,0474	0,0742	0,1221	0,1776	0,2316	0,2774	0,3138	0,3418	0,3616	0,3730
1	0,0296	0,0381	0,0569	0,0858	0,1180	0,1496	0,1742	0,1957	0,2142	0,2298	0,2432
0,5	0,0134	0,0224	0,0375	0,0578	0,0803	0,0986	0,1137	0,1268	0,1378	0,1470	0,1547
					$n = 0,3,\ k = 0,1$						
10	0,0675	0,0782	0,1288	0,2190	0,3244	0,4248	0,5080	0,5656	0,5938	0,5896	0,5518
7	0,0670	0,0758	0,1150	0,1843	0,2648	0,3414	0,4046	0,4492	0,4726	0,4732	0,4510
5	0,0651	0,0720	0,1040	0,1581	0,2204	0,2794	0,3284	0,3630	0,3828	0,3872	0,3762
3	0,0589	0,0663	0,0890	0,1267	0,1691	0,2092	0,2420	0,2658	0,2812	0,2888	0,2892
2	0,0509	0,0586	0,0772	0,1062	0,1381	0,1681	0,1919	0,2094	0,2220	0,2302	0,2350
1	0,0328	0,0416	0,0565	0,0768	0,0982	0,1178	0,1309	0,1408	0,1481	0,1535	0,1580
0,5	0,0148	0,0240	0,0374	0,0538	0,0707	0,0817	0,0885	0,0921	0,0930	0,0919	0,0893
					$n = 0,5,\ k = 0,1$						
10	0,0914	0,1003	0,1231	0,1593	0,2002	0,2384	0,2692	0,2894	0,2986	0,2958	0,2816
7	0,0827	0,0904	0,1095	0,1393	0,1728	0,2038	0,2288	0,2456	0,2536	0,2530	0,2444
5	0,0752	0,0822	0,0984	0,1235	0,1512	0,1767	0,1971	0,2108	0,2180	0,2192	0,2148
3	0,0637	0,0703	0,0837	0,1032	0,1242	0,1433	0,1581	0,1680	0,1740	0,1767	0,1771
2	0,0536	0,0605	0,0727	0,0892	0,1065	0,1220	0,1332	0,1406	0,1453	0,1481	0,1501
1	0,0344	0,0406	0,0540	0,0678	0,0814	0,0929	0,0986	0,1017	0,1027	0,1025	0,1020
0,5	0,0161	0,0252	0,0368	0,0498	0,0621	0,0677	0,0688	0,0662	0,0605	0,0526	0,0431

Продолжение табл. 6

ρ_0/s (0)	a/s (0)										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$n = 0,1$, $k = -0,1$						
10	0,9364	1,0784	1,1198	1,0660	0,9366	0,7440	0,5074	0,2460	—0,0130	—0,2330	—0,3702
7	0,6790	0,7814	0,8132	0,7798	0,6926	0,5600	0,3950	0,2092	0,0173	—0,1609	—0,3002
5	0,5002	0,5758	0,6016	0,5218	0,5238	0,4326	0,3172	0,1846	0,0423	—0,1001	—0,2298
3	0,3104	0,3594	8,3800	0,3746	0,3472	0,2984	0,2342	0,1577	0,0714	—0,0223	—0,1199
2	0,2084	0,2440	0,2626	0,2648	0,2536	0,2266	0,1885	0,1411	0,0858	0,0235	—0,0450
1	0,0960	0,1191	0,1358	0,1462	0,1512	0,1453	0,1321	0,1138	0,0908	0,0634	0,0318
0,5	0,0317	0,0484	0,0638	0,0776	0,0901	0,0925	0,0894	0,0834	0,0743	0,0625	0,0482
					$n = 0,3$, $k = -0,1$						
10	0,4798	0,5414	0,5632	0,5468	0,4980	0,4212	0,3246	0,2154	0,1036	0,0027	—0,0702
7	0,3726	0,4204	0,4386	0,4284	0,3940	0,3380	0,2662	0,1833	0,0946	0,0078	—0,0671
5	0,2924	0,3302	0,3460	0,3406	0,3170	0,2766	0,2234	0,1605	0,0904	0,0168	—0,0551
3	0,1989	0,2262	0,2400	0,2406	0,2300	0,2068	0,1747	0,1348	0,0879	0,0346	—0,0237
2	0,1430	0,1647	0,1778	0,1824	0,1795	0,1660	0,1455	0,1186	0,0858	0,0471	0,0027
1	0,0725	0,0890	0,1022	0,1119	0,1181	0,1137	0,1047	0,0914	0,0739	0,0522	0,0266
0,5	0,0244	0,0383	0,0518	0,0643	0,0736	0,0717	0,0660	0,0568	0,0442	0,0284	0,0097
					$n = 0,5$, $k = -0,1$						
10	0,2502	0,2750	0,2854	0,2818	0,2654	0,2380	0,2020	0,1599	0,1150	0,0714	0,0356
7	0,2078	0,2286	0,2382	0,2364	0,2248	0,2036	0,1753	0,1413	0,1031	0,0631	0,0251
5	0,1735	0,1912	0,2002	0,2002	0,1924	0,1766	0,1546	0,1273	0,0951	0,0590	0,0209
3	0,1291	0,1436	0,1523	0,1552	0,1528	0,1434	0,1292	0,1102	0,0863	0,0575	0,0239
2	0,0990	0,1119	0,1210	0,1262	0,1274	0,1219	0,1122	0,0982	0,0789	0,0567	0,0287
1	0,0549	0,0667	0,0772	0,0859	0,0916	0,0895	0,0837	0,0743	0,0611	0,0441	0,0234
0,5	0,0183	0,0301	0,0420	0,0535	0,0588	0,0554	0,0479	0,0366	0,0215	0,0027	—0,0193

Примечание. Обозначение параметров см. табл 1.

($B = B(0) = 1$) заготовки соответственно имеют вид

$$A(M_z) = \sigma_{T0} s^2 \chi/(2\sqrt{3}) + 2\Pi\{(1 + s^2\chi^2/4)\ln[(2+s\chi)/(2-s\chi)] - s\chi[1 - \ln(1 - s^2\chi^2/4)]\}/(3\chi); \quad (31)$$

$$A(M_z) = \sigma_{T0} s^2 \chi/(2\sqrt{3}) + \Pi s^2\chi^2/18; \quad (32)$$

$$A(M_z) = As(s\chi)^{n+1}/[(2 + 3n + n^2)]\,3^{(n+1)/2}. \quad (33)$$

Круговая нецилиндрическая гибка. *Стержень узкого прямоугольного сечения.* Ширина прямоугольного сечения стержня меньше его высоты: $B(0) < s(0)$. Внешняя осевая нагрузка равна нулю, поэтому осевое напряжение σ_z принято равным нулю по всему стержню. Влияние напряжения σ_ρ также не учитывают.

Продольное прямое волокно, взятое на расстоянии y от граничной поверхности, превращающейся в поверхность радиусом ρ_0 (рис. 6), превращается в дугу радиусом

$$\rho = [3y(\rho_0 + a)^{1/2}/2 + \rho_0^{3/2}]^{2/3}. \quad (34)$$

При $y = s(0)$ $\rho = \rho_k$ (рис. 6), поэтому высота сечения изогнутого стержня

$$s = [3s(0)(\rho_0 + a)^{1/2}/2 + \rho_0^{3/2}]^{2/3} - \rho_0. \quad (35)$$

Геометрическая дуга радиусом ρ ($\varepsilon_\theta = 0$) имеет неизменяющуюся при гибке длину $L = L(0)$. Длина срединной геометрической дуги радиусом $\rho(s/2)$ составляет

$$L = L(0)\{[3s(0)(\rho_0 + a)^{1/2}/2 + \rho_0^{3/2}]^{2/3} + \rho_0\}/[2(\rho_0 + a)]. \quad (36)$$

Ширина B поперечного сечения является функцией координаты ρ:

$$B = B(0)[(\rho_0 + a)/\rho]^{1/2},$$
$$B_k = B(0)[(\rho_0 + a)/\rho_k]^{1/2},$$
$$B_0 = B(0)[(\rho_0 + a)/\rho_0]^{1/2}. \quad (37)$$

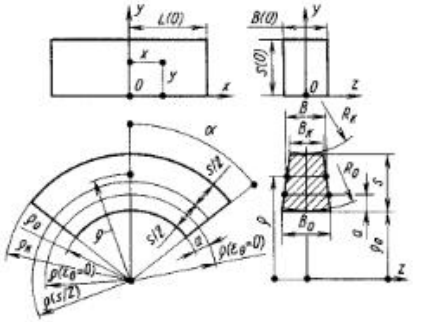


Рис. 6. Схема изменения формы стержня узкого прямоугольного сечения при изгибе

Площадь поперечного сечения

$$F = 2B(0)(\rho_0 + a)^{1/2} \times \left\{\left[\frac{3}{2}(\rho_0 + a)^{1/2} s(0) + \rho_0^{3/2}\right]^{1/3} - \rho_0^{1/2}\right\}, \quad (38)$$

координата его центра тяжести

$$\rho_ц = s(0)(\rho_0 + a)^{1/2}/\{2 \times \{[3(\rho_0 + a)^{1/2} s(0)/2 + \rho_0^{3/2}]^{1/3} - \rho_0^{1/2}\}\}. \quad (39)$$

Поперечное сечение по форме напоминает трапецию с непрямолинейными нижним и верхним основаниями и сторонами. Основания можно представить приближенно дугами окружностей радиусами

$$R_0 = 2\rho_0 + 3a,$$
$$R_k = 2\rho_0 + 3a - s. \quad (40)$$

Если требуется, чтобы изогнутый стержень имел сечение постоянной по ρ ширины $B_0 = B_k = B^*$ и высоты s^*, контур сечения прямого стержня должен иметь переменную по y ширину

$$B^*(0) = \frac{B^*\left[\frac{3}{2}(\rho_0 + a)^{1/2} y + \rho_0^{3/2}\right]^{1/3}}{(\rho_0 + a)^{1/2}} \quad (41)$$

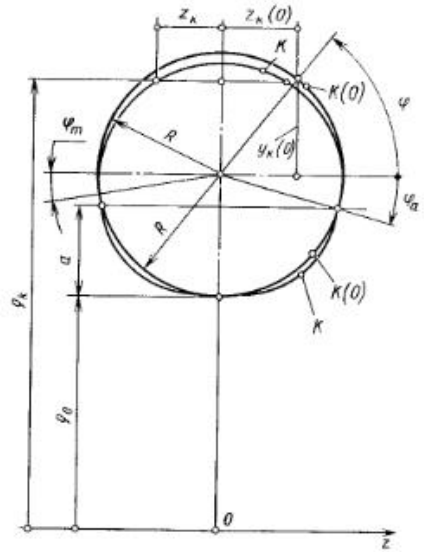


Рис. 7. Координаты $y_к(0)$ $z_к(0)$ частицы на круговом контуре сечения прямого стержня и координаты $ρ_k$, z_k той же частицы на контуре сечения изогнутого стержня

и высоту

$$s^*(0) = \frac{2\left[(\rho_0 + s^*)^{3/2} - \rho_0^{3/2}\right]}{3(\rho_0 + a)^{1/2}}. \quad (42)$$

Основание шириной

$$B_0^*(0) = B^*\left(\frac{\rho_0}{\rho_0 + a}\right)^{1/2} \quad (43)$$

должно быть вогнутым по дуге радиусом R_0 [см. формулу (40)], а другое основание шириной

$$B_k^*(0) = B^*\left(\frac{\rho_0 + s^*}{\rho_0 + a}\right)^{1/2} \quad (44)$$

— выпуклым по дуге радиусом R_k.

Изгибающий момент и тангенциальная сила

$$M_z = 2B(0)(\rho_0 + a) \times$$
$$\times \left\{\rho_ц \sigma_{т0}\left[2 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_0 + a}\right)^{1/2} - \left(\frac{\rho_k}{\rho_0 + a}\right)^{1/2}\right] - \frac{(\rho_0 + a)\sigma_{т0}}{3} \times \right.$$
$$\times \left[2 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_0 + a}\right)^{3/2} - \left(\frac{\rho_k}{\rho_0 + a}\right)^{3/2}\right] -$$
$$- \rho_ц П\left[\left(\frac{\rho_0}{\rho_0 + a}\right)^{1/2} \ln\frac{\rho_1 + a}{\rho_0} + \left(\frac{\rho_k}{\rho_0 + a}\right)^{1/2} \ln\frac{\rho_k}{\rho_0 + a} + \right.$$
$$+ 2\left(\frac{\rho_0}{\rho_0 + a}\right)^{1/2} - 2\left(\frac{\rho_k}{\rho_0 + a}\right)^{1/2}\Big] +$$
$$+ \frac{(\rho_0 + a)П}{3}\left[\left(\frac{\rho_0}{\rho_0 + a}\right)^{3/2} \ln\frac{\rho_0}{\rho_0 + a} + \left(\frac{\rho_k}{\rho_0 + a}\right)^{3/2} \ln\frac{\rho_k}{\rho_0 + a} + \right.$$
$$+ \frac{2}{3}\left(\frac{\rho_0}{\rho_0 + a}\right)^{3/2} - \left.\left. - \frac{2}{3}\left(\frac{\rho_k}{\rho_0 + a}\right)^{3/2}\right]\right\}; \quad (45)$$

$$P_\theta = 2B(0)(\rho_0 + a)^{1/2}\sigma_{т0} \times$$
$$\times \left[\rho_k^{1/2} + \rho_0^{1/2} - 2(\rho_0 + a)^{1/2}\right] +$$
$$+ 2B(0)П(\rho_0 + a)^{1/2} \times$$
$$\times \left(\rho_k^{1/2} \ln\frac{\rho_k}{\rho_0 + a} + \rho_0^{1/2} \ln\frac{\rho_0 + a}{\rho_0} + \right.$$
$$\left. + 2\rho_0^{1/2} - 2\rho_k^{1/2}\right), \quad (46)$$

где $\rho_k = \left[\frac{3}{2}(\rho_0 + a)^{1/2} s(0) + \rho_0^{3/2}\right]^{2/3}$; радиус $\rho_ц$ определяют по формуле (39).

Если $a = s(0)/2$ и $s(0)/\rho_0 < 0{,}2$, а $P_\theta \approx 0$, влияние изменения формы поперечного сечения стержня на величину изгибающего момента можно не учитывать; тогда

$$M_z = \frac{Bs^2}{4}\sigma_{т0} + \frac{BП}{2}\left(\rho_ц s - \rho_0\rho_k \ln\frac{\rho_k}{\rho_0}\right), \quad (47)$$

где $B = B(0)$, $s = s(0)$, $\rho_ц = \rho(s/2)$, $\rho_k = \rho_0 + s(0)$.

Стержень круглого сечения. При изгибе форма сечения стержня изменяется. Если какая-либо частица на круговом контуре $K(0)$ радиусом $R = D/2$ (рис. 7) имела координаты

$$y_k(0) = R\sin\varphi;\ z_k(0) = R\cos\varphi,$$

то на контуре K, изменившего форму в результате изгиба стержня, ее координаты соответствуют

$$\rho_k = \left[\frac{3R}{2}(\rho_0 + a)^{1/2} \times (1 + \sin\varphi) + \rho^{3/2}\right]^{2/3}; \quad (48)$$

$$z_к = R(\rho_0 + a)^{1/2}\left[\frac{3R}{2}(\rho_0 + a)^{1/2} \times (1 + \sin\varphi) + \rho_0^{3/2}\right]^{-1/3}\cos\varphi. \quad (49)$$

Наибольшая ширина сечения $B = 2z_{к\,max}$, где $z_{к\,max}$ — координата точки контура сечения, самой удаленной от оси ρ. Угол φ_m положения этой точки на исходном круговом контуре сечения определяют выражением

$$\sin\varphi_m = -\left(\frac{3}{4} + \frac{\rho_0^{3/2}}{2R(\rho_0 + a)^{1/2}}\right) + \left[\left(\frac{3}{4} + \frac{\rho_0^{3/2}}{2R(\rho_0 + a)^{1/2}}\right)^2 - \frac{1}{2}\right]^{1/2}. \quad (50)$$

Приближенные формулы для изгибающего момента и тангенциальной силы, в которых не учитывается изменение формы и площади поперечного сечения стержня, а деформация взята как относительная, имеют следующий вид:

$$M_z = [4\sigma_{т0}R^3\cos^3\varphi_a + 3\pi П R^4/(4(\rho_0 + a))]/3; \quad (51)$$

$$P_\theta = \pi П R^2(R - a)/(2(\rho_0 + a)) - \sigma_{т0}R^2(2\varphi_a + \sin 2\varphi_a), \quad (52)$$

где $\varphi_a = \arcsin[(R - a)/R]$.

Труба круглого сечения, гибка с несжимаемой оправкой. Конструкции оправок обычно таковы, что они могут изгибаться вместе с трубой при неизменных форме и радиусе своего поперечного сечения, препятствуя искажению круглой формы сечения трубы. В зависимости от размера a (рис. 8), длина контура поперечного сечения трубы при ее изгибе может сокращаться или увеличиваться. Когда длина контура сокращается, труба сдавливает оправку по всему контуру ее сечения, если исходный зазор между трубой и оправкой недостаточен, чтобы выбрать, скомпенсировать это сокращение. Когда длина контура увеличивается, зазор будет увеличиваться при неравномерном его распределении по углу φ (при $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$ он будет всегда равен нулю). Длина контуров $l(0)$ — исходного сечения трубы и l — сечения изогнутой трубы связаны между собой. Зависимость отношения $l/l(0)$ от отношения a/r для различных значений ρ_0/r представлена на рис. 9.

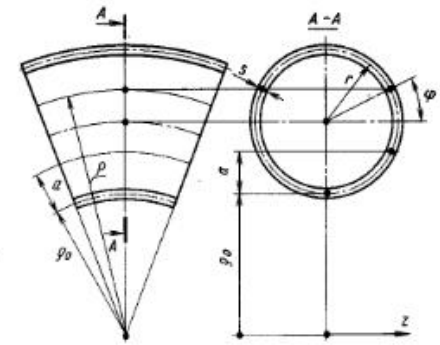


Рис. 8. Изгиб трубы круглого сечения с несжимаемой оправкой

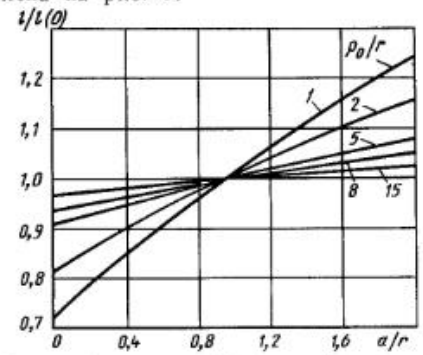


Рис. 9. Зависимость $l/l(0)$ от a/r для различных значений ρ_0/r

7. Безразмерные составляющие изгибающего момента m_σ, $m_\text{п}$ и тангенциальной силы p_σ, $p_\text{п}$

Параметр	r/ρ_0								
	1/1	1/2	1/3	1/5	1/7	1/8	1/10	1/12	1/15
					$a/r = 0$				
m_σ	0,0303	0,0320	0,0328	0,0335	0,0338	0,0340	0,0343	0,0343	0,0345
$m_\text{п}$	0,6335	0,4515	0,3505	0,2422	0,1850	0,1655	0,1368	0,1165	0,0953
p_σ	2,3080	2,58622	2,7188	2,8480	2,9125	2,9340	2,9653	2,9868	3,0093
$p_\text{п}$	0,5148	0,3635	0,2813	0,1940	0,1481	0,1325	0,1094	0,0932	0,0762
					$a/r = 0,2$				
m_σ	1,1180	1,1538	1,1725	1,1918	1,2018	1,2050	1,2098	1,2133	1,2168
$m_\text{п}$	0,6940	0,4735	0,3620	0,2470	0,1878	0,1675	0,1380	0,1175	0,0958
p_σ	1,1608	1,3825	1,4897	1,5968	1,6508	1,6688	1,6950	1,7133	1,7323
$p_\text{п}$	0,3767	0,2764	0,2171	0,1517	0,1166	0,1045	0,0865	0,0738	0,0605
					$a/r = 0,4$				
m_σ	1,4633	1,4768	1,4880	1,5010	1,5085	1,5110	1,5148	1,5173	1,5203
$m_\text{п}$	0,7498	0,4948	0,3730	0,2518	0,1903	0,1695	0,1395	0,1183	0,0965
p_σ	0,8158	1,0143	1,1093	1,2038	1,2513	1,2610	1,2903	1,3063	1,3230
$p_\text{п}$	0,2360	0,1887	0,1527	0,1094	0,0850	0,0764	0,0636	0,0544	0,0447
					$a/r = 0,6$				
m_σ	1,8275	1,8313	1,8390	1,8500	1,8568	1,8590	1,8625	1,8653	1,8678
$m_\text{п}$	0,8015	0,5148	0,3840	0,2563	0,1928	0,1715	0,1408	0,1198	0,0970
p_σ	0,1508	0,3438	0,4335	0,5215	0,5653	0,5800	0,6013	0,6160	0,6313
$p_\text{п}$	0,0940	0,1007	0,0882	0,0670	0,0533	0,0483	0,0406	0,0350	0,0290
					$a/r = 0,8$				
m_σ	1,9838	1,9660	1,9645	1,9668	1,9693	1,9703	1,9720	1,9733	1,9745
$m_\text{п}$	0,8500	0,5343	0,3945	0,2608	0,1953	0,1735	0,1420	0,1203	0,0978
p_σ	−0,2640	0,0653	0,0243	0,1103	0,1528	0,1668	0,1873	0,2013	0,2158
$p_\text{п}$	−0,0484	0,0125	0,0236	0,0246	0,0217	0,0203	0,0177	0,0156	0,0133
					$a/r = 1,0$				
m_σ	2,0678	2,0258	2,0125	2,00335	2,0033	2,0003	1,9995	1,9978	1,9973
$m_\text{п}$	0,8960	0,5530	0,4048	0,26535	0,1978	0,1755	0,1433	0,1213	0,0983
p_σ	−0,5613	−0,3493	−0,2563	−0,16835	−0,1255	−0,1115	−0,0910	−0,0770	−0,0625
$p_\text{п}$	−0,1906	−0,0756	−0,0410	−0,01780	−0,0099	−0,0078	−0,0052	−0,0037	−0,0025
					$a/r = 1,2$				
m_σ	2,1145	2,0528	2,0293	2,0100	2,0015	1,9990	1,9955	1,9930	1,9908
$m_\text{п}$	0,9398	0,5713	0,4148	0,2698	0,2003	0,1775	0,1448	0,1220	0,0990
p_σ	−0,8778	−0,6463	−0,5470	−0,4538	−0,4090	−0,3943	−0,3730	−0,3585	−0,3435
$p_\text{п}$	−0,3324	−0,1638	−0,1056	−0,0602	−0,0416	−0,0359	−0,0282	−0,0231	−0,0182
					$a/r = 1,4$				
m_σ	2,0455	1,9755	1,9470	1,9218	1,9105	1,9068	1,9018	1,8983	1,8948
$m_\text{п}$	0,9815	0,5888	0,4245	0,2740	0,2028	0,1795	0,1460	0,1230	0,0995
p_σ	−1,3503	−1,0958	−0,9865	−0,8853	−0,8368	−0,8210	−0,7983	−0,7825	−0,7665
$p_\text{п}$	−0,4735	−0,2517	−0,1702	−0,1026	−0,0732	−0,0640	−0,0511	−0,0425	−0,0339
					$a/r = 1,6$				
m_σ	1,6788	1,6198	1,5948	1,5723	1,5618	1,5583	1,5535	1,5503	1,5468
$m_\text{п}$	1,0218	0,6058	0,4340	0,2783	0,2050	0,1813	0,1473	0,1240	0,1003
p_σ	−2,1180	−1,8358	−1,7148	−1,6025	−1,5490	−1,5315	−1,5063	−1,4890	−1,4715
$p_\text{п}$	−0,6138	−0,3394	−0,2346	−0,1449	−0,1048	−0,0920	−0,0748	−0,0619	−0,0497
					$a/r = 1,8$				
m_σ	1,3795	1,3235	1,2988	1,2753	1,2643	1,2605	1,2553	1,2515	2,4775
$m_\text{п}$	1,0603	0,6225	0,4433	0,2825	0,2075	0,1833	0,1485	0,1248	0,1008
p_σ	−2,6233	−2,3095	−2,1750	−2,0480	−1,9878	−1,9680	−1,9395	−1,9200	−1,9000
$p_\text{п}$	−0,7532	−0,4269	−0,2990	−0,1873	−0,1364	−0,1201	−0,0969	−0,0813	−0,0654
					$a/r = 2,0$				
m_σ	0,0398	0,0380	0,0370	0,0363	0,0360	0,0358	0,0358	0,0355	0,0355
$m_\text{п}$	1,0975	0,0385	0,4525	0,2865	0,2098	0,1850	0,1498	0,1258	0,1015
p_σ	−4,0230	−3,6733	−3,5200	−3,3763	−3,3070	−3,2843	−3,2515	−3,2290	−3,2058
$p_\text{п}$	−0,8916	−0,5141	−0,3632	−0,2296	−0,1680	−0,1481	−0,1198	−0,1006	−0,0811

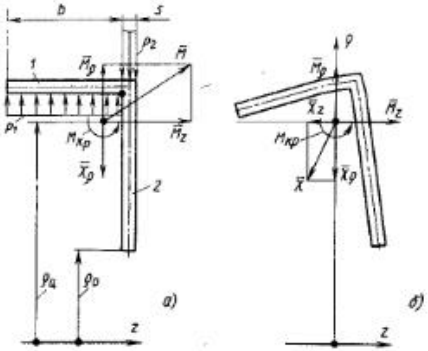


Рис. 10. Несимметричное относительно плоскости изгиба поперечное сечение стержня:

а — система внешних сил и моментов, предотвращающая поворот, искажение сечения и уход центральной линии из плоскости изгиба; *б* — поворот и искажение сечения при изгибе стержня под действием только момента

При исходной равномерной по φ толщине $s(0)$ стенки прямой трубы толщина стенки изогнутой трубы (см. рис. 8)

$$s = s(0)(\rho_0 + a)^{1/2}(\rho_0 + r + r\sin\varphi)^{-1/2}. \quad (53)$$

При $\varphi = \pi/2$ $s = s_{\min}$ и при $\varphi = (3/2)\pi$ $s = s_{\max}$:

$$s_{\min} = s(0)(\rho_0 + a)^{1/2}(\rho_0 + 2r)^{-1/2};$$

$$s_{\max} = s(0)(\rho_0 + a)^{1/2}\rho_0^{-1/2}.$$

Изгибающий момент и продольную (тангенциальную) силу определяют по табл. 7.

Необходимые для изгиба трубы изгибающий момент и продольную силу вычисляют в виде сумм:

$$M_z = (m_\sigma \sigma_{T0} + m_\Pi \Pi) r^2 s(0); \quad (54)$$

$$P_\theta = (p_\sigma \sigma_{T0} + p_\Pi \Pi) rs(0). \quad (55)$$

Стержень с несимметричной относительно плоскости гибки формой поперечного сечения. При круговой гибке стержня с несимметричной формой поперечного сечения центральная линия остается в плоскости гибки, и форма сечения сохраняет заданные исходные очертания, если система внешних сил соответствует внутренним силам, действующим в изогнутом стержне. Например, для стержня с сечением в виде уголка (рис. 10, *а*) изгибающий момент как вектор $\bar{M}$ имеет два компонента — M_z и M_ρ. На поверхностях шириной b и s должны действовать такие внешние давления p_1 и p_2, чтобы на границе между частями сечений *1* и *2* не возникала сдвигающая сила и полностью компенсировались соответствующие внутренние силы и крутящий момент $M_{кр}$ вокруг центральной линии.

Система внешних сил обеспечивается при нагружении с помощью оправок, профилирования рабочих поверхностей гибочных и вспомогательных роликов, рабочих поверхностей копиров и нажимных колодок и т. д. Если же гибка выполняется под действием только одного компонента M_z изгибающего момента, форма сечения не сохраняет исходные очертания, а центральная линия не является плоской круговой кривой (рис. 10, *б*), так как соответствующая система внутренних сил и моментов существенно отличается от рассмотренной.

Некруговая цилиндрическая и нецилиндрическая гибка. Гибка является некруговой, если кривизна изгиба непостоянная по углу θ. Непостоянны по углу θ и внешние нагрузки (изгибающий момент, продольные и поперечные силы и т. д.).

Гибка под действием поперечной силы. Изгибающий момент в поперечном сечении заготовки, возникающий под действием поперечной силы P, прямо пропорционален плечу l действия силы: $M = Pl$. В сечении действуют нормальные и касательные напряжения, развиваются продольные, поперечные и угловые деформации. В результате этих деформаций происходит изменение кривизны заготовки.

Различают гибку при относительно большом и относительно малом плече действия силы P. Гибка при относительно большом плече, когда $l/s \geqslant 5$; при относительно малом, когда $l/s < 5$.

Гибка при относительно большом плече. При относительно большом плече

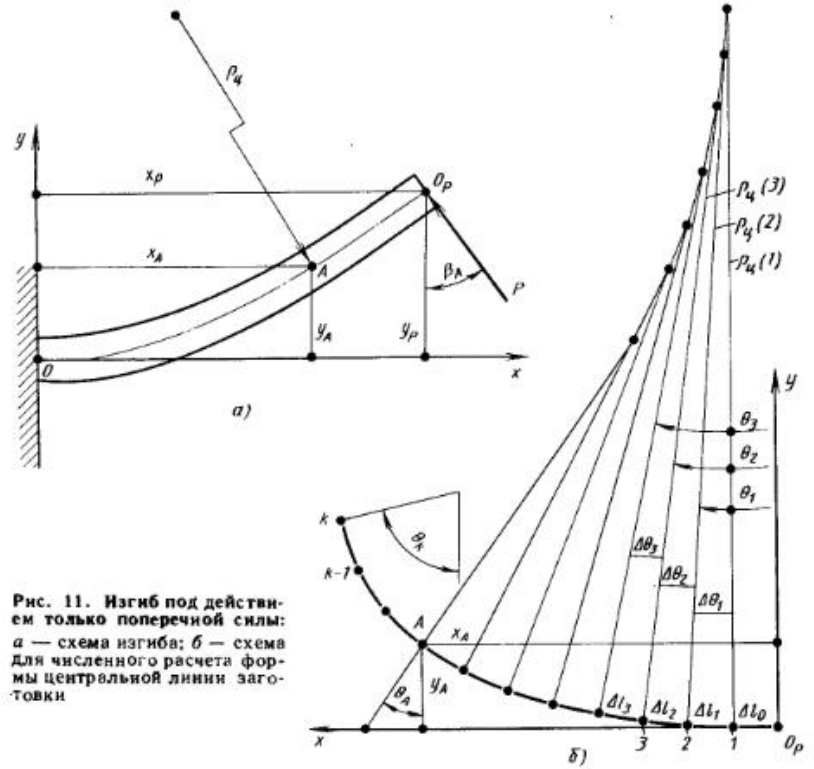


Рис. 11. Изгиб под действием только поперечной силы:

а — схема изгиба; *б* — схема для численного расчета формы центральной линии заготовки

действия поперечной силы касательные напряжения в поперечных сечениях заготовки относительно малы, и их влиянием на процесс формоизменения можно пренебречь. Внешний изгибающий момент подсчитывают по формуле

$$M = P(x_P - x_A)\cos\beta_A + P(y_P - y_A)\sin\beta_A. \quad (56)$$

Считают, что внешняя сила P — сосредоточенная, приложена в точке O_P (рис. 11). Внутренний изгибающий момент, равный внешнему моменту, определяют по формулам, полученным для кругового изгиба под действием только изгибающего момента. Согласно этим формулам радиус $\rho_ц$ кривизны в точке A центральной линии рассматриваемого поперечного сечения однозначно связан с изгибающим моментом, зависит от координат точки A и может быть найден для любой точки этой линии. Форму центральной линии (функцию $y_A = y_A(x_A)$) можно найти с помощью уравнений дифференциальной геометрии. Она не может быть представлена в виде точного уравнения кривой. В решение обычно вводят упрощающие предпосылки.

Функция $y_A(x_A)$ может быть найдена без использования уравнений дифференциальной геометрии и введения упрощающих предпосылок. Центральную линию делят на k отрезков. Начало координат располагают в точке O_P (рис. 11, *б*). Принимают, что начальный отрезок Δl_0 прямой. Изгибающий момент на конце этого отрезка $M_1 = P\Delta l_0$. Этому моменту соответствует (согласно формуле для момента внутренних сил) определенный радиус кривизны $\rho_ц(1)$. Следующий отрезок считают дугой этого радиуса. Вычисляют координаты конца отрезка

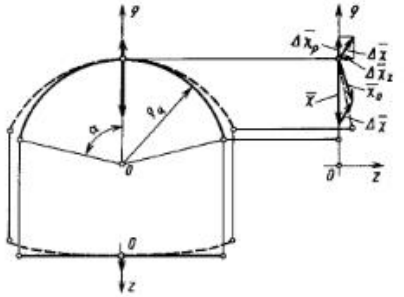


Рис. 12. Схема превращения плоской центральной линии в пространственную в процессе разгрузки изогнутого стержня с несимметричным сечением

и угол $\Delta\theta_1 = \Delta l_0/\rho_{ц}$ (1). По результатам этих вычислений определяют внешний изгибающий момент, равный внутреннему, и затем соответствующий этому моменту радиус кривизны $\rho_{ц}$ (2). Проводят еще один отрезок в виде дуги этого радиуса кривизны и т. д. Применительно к системе координат с началом в точке O_P уравнение для внешнего изгибающего момента имеет вид (см. рис. 11, *б*)

$$M = P[(x_A \cos\theta_A + y_A \sin\theta_A)\cos\theta_A + (x_A \sin\theta_A - y_A \cos\theta_A)]. \quad (57)$$

В таком порядке проводят вычисления для всех k отрезков.

Угол, в растворе которого находится рассматриваемый отрезок линии,

$$\theta_k = \sum_{i=1}^{i=k-1} \Delta\theta_i. \quad (58)$$

Путем подбора числа k можно получить любую, наперед заданную точность координат точек кривой $y_A(x_A)$.

Гибка при относительно малом плече. При относительно малом плече действия поперечной силы касательные напряжения и деформации сдвига существенно влияют на силовую и деформационную картины гибки.

Формула $P = Ml$ для расчета поперечной силы по внутреннему изгибающему моменту становятся неприемлемой. В частности, согласно этой формуле при $l \to 0$ $P \to \infty$. В действительности же сила P не может превышать той величины, которая необходима для изгиба только за счет деформации сдвига.

Сила сдвига на единицу размера B, необходимая для изгиба листа только за счет деформации сдвига, может быть найдена по приближенной формуле

$$P_{сд} \approx 0{,}5s\sigma_в [0{,}7\mathbf{e}s/(n(\rho_0 + s))]^n, \quad (59)$$

где n — показатель степени кривой упрочнения металла; $\mathbf{e}$ — основание натурального логарифма; $s = s(0)$.

Пружинение. На изогнутую (нагруженную) заготовку могут действовать: изгибающий момент относительно оси, параллельной оси z; момент относительно оси, перпендикулярной к плоскости z, ρ; продольная сила; поперечные силы — радиальная и осевая. Продольную и осевую силы приводят к центрам тяжестей площадей, на которых они действуют, а моменты приводят к осям, проходящим через эти же центры тяжести. Поэтому упругие деформации при разгрузке заготовки можно привести к продольным деформациям, равномерно распределенным по соответствующим сечениям, и изгибным деформациям, вызывающим разгрузочное приращение $\Delta\chi_\rho = 1/\rho_{ц.р}$ кривизны $\chi_\rho = 1/\rho_{ц}$ центральной линии и соответствующее приращение угла, в растворе которого рассматривается отрезок центральной линии. В результате происходит упругое изменение формы заготовки, причем влияние на это изменение длины заготовки, измеряемой по центральной линии, несущественно и обычно не учитывается.

Упругое изменение формы при разгрузке изогнутого в определенной плоскости стержня с несимметричной формой сечения приводит к тому, что его плоская центральная линия становится неплоской. Разгрузочное приращение кривизны представляет собой вектор $\Delta\vec{\chi}$ с двумя составляющими $\Delta\vec{\chi}_\rho$ и $\Delta\vec{\chi}_z$ (рис. 12):

$$\Delta\chi_\rho = M_z/EJ_z, \quad \Delta\chi_z = M_\rho/EJ_\rho, \quad (60)$$

где M_z и J_z — соответственно изгибающий момент и момент инерции сечения относительно оси, параллельной оси z; M_ρ и J_ρ — то же, относительно оси, параллельной оси ρ.

Для того чтобы после разгрузки центральная линия была плоской, при гибке помимо кривизны $1/\rho_{ц}$ ей должна быть придана еще кривизна, приблизительно равная по величине приращению $\Delta\chi_z$ и обратная по направлению.

Приращение кривизны при разгрузке изогнутой листовой заготовки

$$\Delta\chi_\rho = 1/\rho_{ц.р} = (1-\mu^2)M_z/(EJ), \quad (61)$$

где M_z — действующий в нагруженном состоянии и падающий до нуля при разгрузке изгибающий момент относительно оси z, проходящий через центр тяжести сечения заготовки плоскостью z, ρ; J_z — момент инерции сечения относительно этой оси; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона.

Оставшаяся после разгрузки кривизна

$$1/\rho_{ц.о} = 1/\rho_{ц} - 1/\rho_{ц.р}. \quad (62)$$

Кривизну $1/\rho_{ц}$, на которую должна быть изогнута заготовка, чтобы после разгрузки (раскрытия штампа) деталь имела кривизну $1/\rho_{ц.о}$, определяют по формуле

$$1/\rho_{ц} = [2\sqrt{3}\sigma_{т0}(1-\mu^2) + Es/\rho_{ц.о}]/\{s[E - 4\Pi(1-\mu^2)/3]\}. \quad (63)$$

Если заготовка в виде стержня с симметричной формой поперечного сечения, в этих формулах принимают $\mu = 0$.

Момент M_z, кривизна $1/\rho_{ц}$ и ее приращение $1/\rho_{ц.р}$ постоянны по координате θ при круговой гибке и переменны при некруговой. Центральную линию $y_A = y_A(x_A)$ переменной кривизны $1/\rho_{ц}$ строят численно. В такой же последовательности строят центральную линию $y_{A.o} = y_{A.o}(x_{A.o})$ переменной кривизны $1/\rho_{ц.o}$ (рис. 13). Для каждого отрезка Δl_i кривизну $1/\rho_{ц.o}$ (i) вычисляют по формуле (62). Затем определяют угол $\Delta\theta_{io} = \Delta l_i/\rho_{ц.o}$ (i). Угол

$$\theta_{ko} = \sum_{i=1}^{i=k-1} \Delta\theta_{io}. \quad (64)$$

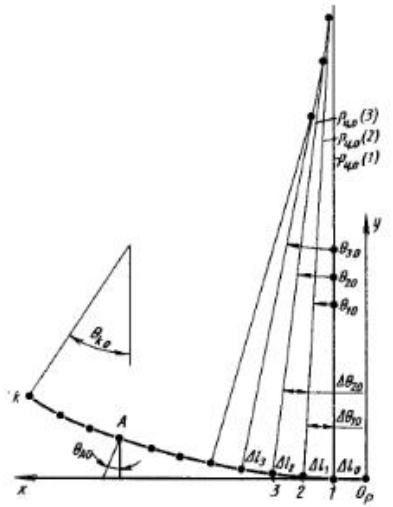


Рис. 13. Схема для численного расчета формы центральной линии после разгрузки

При круговой гибке изменение кривизны заготовки от $1/\rho_{ц}$ до $1/\rho_{ц.o}$ вызывает изменение угла α дуги центральной линии на величину

$$\Delta\alpha = \alpha(1 - \rho_{ц}/\rho_{ц.o}). \quad (65)$$

При некруговой гибке изменению формы центральной линии соответствует изменение угла θ_k на величину

$$\Delta\theta_k = \theta_{ko} - \theta_k. \quad (66)$$

Ограничение кривизны гибки, связанное с исчерпанием пластичности. Изменение кривизны заготовки при гибке ограничено пластичностью металла. Расположение опасной области зависит от разновидности гибки, формы сечения в плоскости z, ρ и строения заготовки (монолитная, биметаллическая, многослойная и т.д.) Формулы для расчета предельной кривизны изгиба имеются лишь для простейших случаев формоизменения.

При круговом цилиндрическом изгибе монолитного листа, когда $B = B(0)$, пластичность металла в слое радиуса ρ_k меньше, чем в слое радиуса ρ_0. Но интенсивность деформации может быть больше в слое радиуса ρ_0 при $a/s(0) > 0{,}5$. Таким образом, если

$a/s\,(0)$ таково, что интенсивность деформации в приповерхностных слоях одинакова, наибольшее формоизменение определяют для слоя радиуса ρ_k; если же интенсивность деформации в слое радиуса ρ_0 больше, чем в слое радиуса ρ_k, вычисляют предельную кривизну для обоих слоев. Для слоя радиуса ρ_k предельная относительная кривизна

$$(s/\rho_0)^k_{\text{пр}} = \{[\exp(\sqrt{3}\varepsilon^k_p/2)] - 1\}/\{1 - (a/s)\exp(\sqrt{3}\varepsilon^k_p/2)\},$$

$$\sigma_0/\sigma = \sqrt{3}. \qquad (67)$$

Для слоя радиуса ρ_0

$$(s/\rho_0)^0_{\text{пр}} = \{[\exp(\sqrt{3}\varepsilon^0_p/2)] - 1\}\, s/a,$$

$$\sigma_0/\sigma = -\sqrt{3}, \qquad (68)$$

где s вычисляют по формуле (13); ε^k_p — деформация разрушения металла, определяют по кривой пластичности $\varepsilon_p(\sigma_0/\sigma)$ при $\sigma_0/\sigma = \sqrt{3}$; ε^0_p — то же, при $\sigma_0/\sigma = -\sqrt{3}$. Действительной предельной кривизной будет наименьшая.

При круговой гибке стержня прямоугольного сечения для слоя радиуса ρ_k

$$(s/\rho_0)^k_{\text{пр}} = [(\exp\varepsilon^k_p) - 1]/[1 - (a/s)\exp\varepsilon^k_p],\quad \sigma_0/\sigma = 1. \qquad (69)$$

Для слоя радиуса ρ_0

$$(s/\rho_0)^0_{\text{пр}} = [(\exp\varepsilon^0_p) - 1]\, s/a,\quad \sigma_0/\sigma = -1, \qquad (70)$$

где s вычисляют по формуле (35); ε^k_p — деформация разрушения металла; определяют по кривой пластичности $\varepsilon_p(\sigma_0/\sigma)$ при $\sigma_0/\sigma = 1$; ε^0_p — то же, при $\sigma_0/\sigma = -1$.

Ограничение кривизны гибки, связанное с локализацией деформации. Природа явления локализации деформации при круговом изгибе состоят в следующем. Вследствие несовершенств исходной геометрической формы заготовки, выражающихся в непостоянстве площади ее сечения по координате θ (координате x в исходном состоянии) и неоднородности металла по той же координате, нарушается круговой вид изгиба. Кривизна становится непостоянной по θ, т. е. теперь является функцией θ. В некоторой точке центральной линии, в наиболее ослабленном сечении, она имеет наибольшее значение. Из условия статического равновесия продольная сила и изгибающий момент постоянны по θ, т. е. одинаковы в любых двух сечениях. Это позволяет получить связь кривизны в ослабленном сечении с кривизной в любом другом сечении в предположении, что нарушение кругового вида изгиба относительно мало. По мере развития процесса изгиба кривизна в слабом сечении нарастает быстрее, чем в любом другом, и когда приращение кривизны в любом, более сильном сечении становится нулевым, изгиб целиком локализуется в окрестности слабого сечения. Для металла, нечувствительного к скорости деформации, это условие реализуется, когда приращение продольной силы dP_θ или приращение изгибающего момента dM_z становятся нулевым. Но максимум силы P_θ возникает раньше, чем максимум момента M_z. Поэтому начало резкой локализации деформации совпадает с мгновением, когда $dP_\theta = 0$. Если металл чувствителен к скорости деформации, это условие не реализуется.

Расчет заготовки. Расчет заготовки ведется по геометрическим параметрам срединной поверхности детали, ее продольного сечения плоскостью ρ, θ, представляющего собой срединную линию, а также ее поперечного сечения плоскостью z, ρ. Срединная линия может представлять собой дугу постоянной или переменной кривизны в растворе угла α, а может состоять из ряда сопряженных между собой дуг и прямых отрезков. На чертеже детали обычно указывается, что в точках сопряжений кривизна меняется скачкообразно. Это равносильно предпосылке, что поперечная плоскость, проходящая через точку сопряжения дуги и прямой, является границей между областями пластической и упругой деформаций. В действительности между этими областями имеется переходная область, в которой угловые пластические деформации соизмеримы с продольными. Эта область распространяется примерно на $(0{,}5 \div 0{,}7)\,s$ от точки сопряжения. В расчетах заготовки эти области не учитывают.

При круговом изгибе срединная поверхность сектора цилиндрической оболочки меняет свои размеры от $L\,(0)$ до $L = \alpha\rho\,(s/2)$ в продольном и от $B\,(0)$ до B в поперечном направлении. Соответственно меняется и размер в другом поперечном направлении от $s\,(0)$ до s. На чертеже детали для каждого отрезка дуги и прямой срединной линии заданы размеры L, B, s и $\rho\,(s/2)$. При разработке технологии гибки определяют геометрические параметры гибки, т. е. расстояние a и деформацию ε_z в осевом направлении, которым отвечают определенные силовые и энергетические параметры. Начальные размеры, т. е. размеры заготовки

$$L\,(0) = \alpha\rho\,(\varepsilon_\theta = 0) = \alpha\,(\rho_0 + a); \qquad (71)$$

$$B\,(0) = B\exp(-\varepsilon_z); \qquad (72)$$

$$s\,(0) = (s^2 + 2s\rho_0)/[2\,(\rho_0 + a)\exp(-\varepsilon_z)]. \qquad (73)$$

Если $\varepsilon_z = 0$, $B = B\,(0)$, то

$$s\,(0) = (s^2 + 2s\rho_0)/[2\,(\rho_0 + a)]. \qquad (74)$$

В случае, когда $a = s/2$, $s\,(0) = s$, $L\,(0) = L$.

При круговой нецилиндрической гибке монолитного стержня

$$L\,(0) = 2L\,(\rho_0 + a)/\{[(3/2) \times (\rho_0 + a)^{1/2} s\,(0) + \rho_0^{3/2}]^{2/3} + \rho_0\}. \qquad (75)$$

Для заготовки круглого сечения высоту $s\,(0)$ сечения принимают равной диаметру D.

Когда начальная длина каждого отрезка срединной линии детали найдена, длину заготовки определяют как их сумму.

Если сечение стержневой заготовки прямоугольное, размеры искаженного сечения детали отвечают равенствам (37), а если круглое, — равенствам (48) и (49). Когда сечение детали задано прямоугольным, форма и размеры сечения заготовки должны отвечать равенствам (41)—(44).

3. ГИБКА В ШТАМПАХ

Схемы формоизменения и взаимодействия заготовки и штампа. Схемы формоизменения заготовки и ее взаимодействия со штампом изображены в их сечении плоскостью ρ, θ.

Схема 1 (рис. 14). Пуансон, имеющий рабочую поверхность радиуса $r_п$, движется относительно матрицы. Полость матрицы состоит только из опорных поверхностей радиуса $r_м$. Заготовка контактирует с пуансоном на участке $ОП$, а с матрицей — по площадке контакта, расположенной по обе стороны от линии, проходящей через точку m (рис. 15). Центральная линия

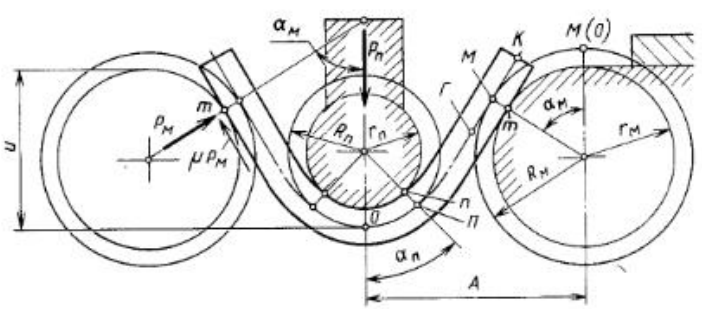


Рис. 14. Схема 1 гибки

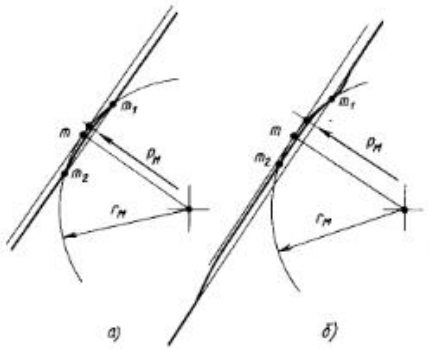


Рис. 15. Схема смятия поверхностей контакта заготовки и матрицы:
а — упругий контакт; *б* — упругопластический

на участке $ПМ$ (рис. 16) имеет переменную кривизну, а на участке $ОП$ она может быть двух видов: постоянной, равной кривизне $1/R_п$ пуансона (рис. 16), и переменной (рис. 17). Если кривизна переменная, в начале процесса формоизменения площадка контакта заготовки с пуансоном будет находиться около точки $О$. Кривизна центральной линии заготовки здесь наибольшая. При дальнейшем изгибе заготовки эта кривизна увеличивается, достигает значения $1/R_п$ и продолжает расти дальше. Площадка контакта, находящаяся вначале около точки $О$, распадается на две площадки, расположенные около точек $П$, движущихся от точки $О$. Кривизна в точках $П$ некоторое время остается меньше $1/R_п$, затем становится равной $1/R_п$, после чего заготовка наматывается на пуансон; принимая его кривизну (рис. 18). На участке $ПМ$ имеется зона упругой, упругопластической и пластической деформации. Протяженность упругой зоны (отрезок $ГМ$ см. рис. 16), например для низкоуглеродистой стали, составляет 1/3–1/4 отрезка $ПМ$. Поэтому деталь на участке $ПГ$ имеет остаточную кривизну.

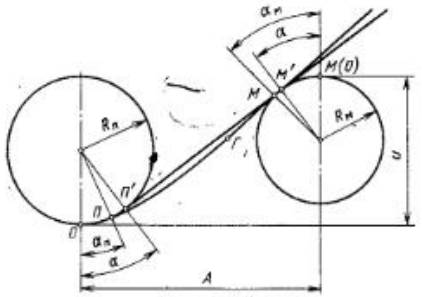


Рис. 16. Действительная (*ОПГМ*) и упрощенная (*ОП'М'*) форма центральной линии заготовки

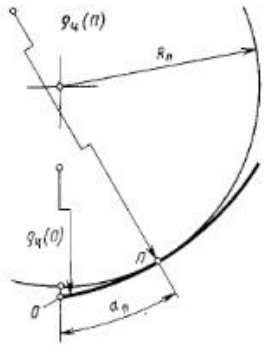


Рис. 17. Вид центральной линии на участке *ОП*

Для приближенного расчета сил технологических параметров участок $ПМ$ представляют в виде прямого отрезка $П'М'$ (см. рис. 16), геометрически связанного с углом α равенством

$$ПМ \approx П'М' = l = [A - (R_п + R_м)\sin\alpha]/\cos\alpha, \quad R_п + R_м = r_п + r_м + s \qquad (76)$$

и имеющего минимум

$$l = l_{min} = \sqrt{A^2 - (R_п + R_м)^2} \qquad (77)$$

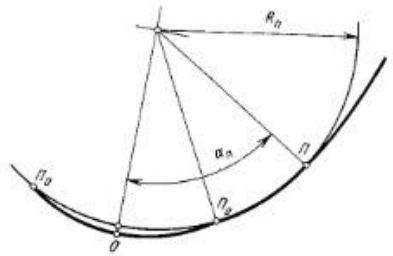


Рис. 18. Изменение центральной линии на участке *ОП* по мере увеличения угла $\alpha_п$

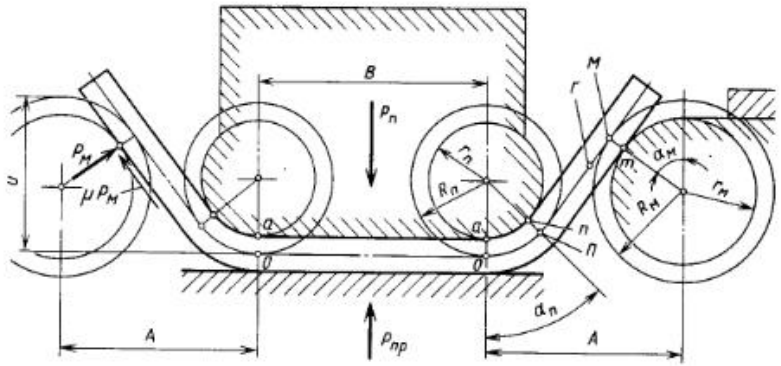


Рис. 19. Схема 2 гибки

при

$$\alpha = \alpha_m = \arcsin[(R_п + R_м)/A]. \qquad (78)$$

Ход инструмента

$$u \approx [A\sin\alpha - (R_п + R_м) \times (1 - \cos\alpha)]/\cos\alpha. \qquad (79)$$

Если $A = R_п + R_м$, то $l_{min} = 0$, $\alpha = \alpha_m = \pi/2$, $u = R_п + R_м$.

Нормальная сила $P_м$ на площадках контакта m_1m_2 (см. рис. 15) проходит близко от точки m геометрического касания, если контакт упругий (см. рис. 15, *а*). Если контакт пластический, точка, через которую проходит равнодействующая $P_м$, несколько смещается (см. рис. 15, *б*).

Схема 2 (рис. 19). Заготовка на участке B находится под воздействием силы $P_{пр}$ со стороны прижимного устройства матрицы. Если прижимного устройства нет или же развиваемое им усилие $P_{пр}$ недостаточно, на участке B образуется прогиб f (рис. 20, 21).

Схема 3 (рис. 22). Здесь матрица движется вверх. Можно выделить несколько этапов, различных по характеру формоизменения заготовки. Формоизменение на первом этапе такое же, как по схеме 1. Этап кончается, когда точка m займет положение точки $u_м$, точка M — положение точки $И_м$. После этого мгновения начинается второй этап. Точка M движется по прямой $И_мИ_м$ (рис. 23), приближается к точке $Г$, отделяющей участок $ГК$, на котором металл ранее не вступал в пластическое состояние, проходит эту точку и движется дальше. Теперь перед точкой M движется участок, на котором в каждое данное мгновение металл находится в упругом состоянии, но ранее частично или весь находился в пластическом и упругопластическом состояниях. Длина отрезка $ПМ$ и упругого участка на

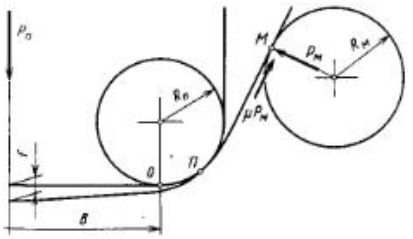


Рис. 20. Центральная линия заготовки с прогибом на участке *B* в штампе без прижимного устройства

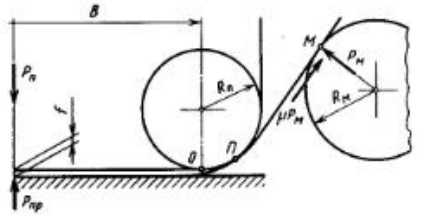


Рис. 21. Центральная линия заготовки с прогибом на участке *B*, когда усилие прижимного устройства штампа недостаточно

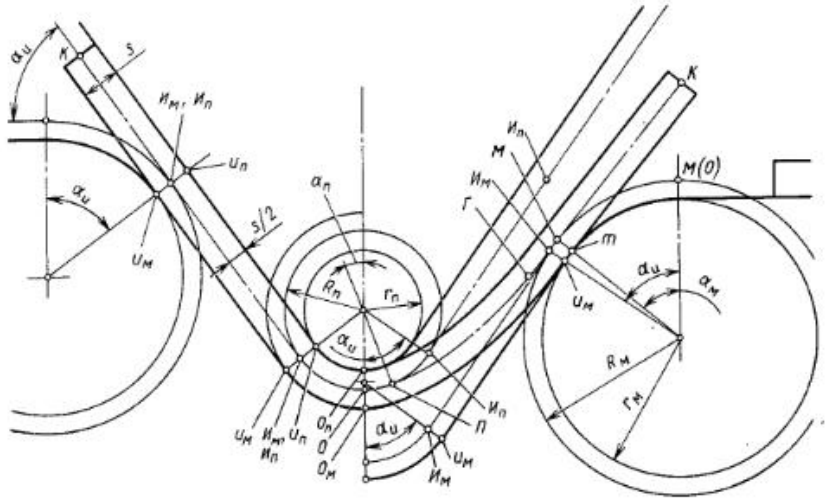


Рис. 22. Схема 3 гибки

ием сокращается, точка K приближается к линии $И_п И_п$, отражающей рабочую поверхность $u_п u_п$ пуансона, точка $П$ приближается к точке $И_п$. Этап кончается, когда точка K оказывается на линии $И_п И_п$, т. е. когда конец заготовки упирается в поверхность пуансона, а точка $П$ еще не достигает точки $И_п$. После этого мгновения начинается третий этап. Точка $П$ продолжает приближаться к точке $И_п$. На относительно небольшой части отрезка $ПМ$, примыкающей к точке $П$, продолжается изгиб, а вне ее идет разгиб (спрямление), причем некоторый участок у точки K упруго изгибается в обратном направлении (перегибается). Третий этап кончается, когда точка $П$ займет положение точки $И_ц$, причем вся линия $ПК$ становится прямой и сливается с линиями $И_п И_п$ и $И_м И_м$ в одну линию (см. рис. 22, левая сторона). После этого мгновения начинается четвертый этап — упругое сжатие заготовки между поверхностями инструмента.

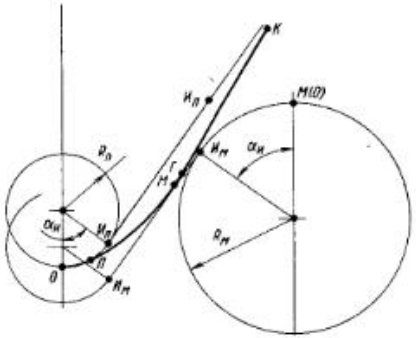


Рис. 23. Форма центральной линии заготовки на втором этапе формоизменения при гибке по схеме 3

Если на первом этапе на участке $ОП$ имел место изгиб по схемам, показанным на рис. 17, 18, для того чтобы заготовка на участке $ОП$ (см. рис. 17) приняла кривизну $1/R_п$, на части этого участка, примыкающей к точке $П$, кривизна должна быть увеличена, а на другой части — около точки $О$ — уменьшена. Т. е. должен происходить дальнейший изгиб на одной части и разгиб — на другой. Это будет иметь место при сближении рабочих поверхностей $u_м O_м$ и $u_п O_п$ матрицы и пуансона (см. рис. 22).

Если же на первом этапе формоизменения имеет место вид изгиба по схеме, показанной на рис. 16, необходимость задавать строго рабочую поверхность на участке $u_м O_м$ матрицы отпадает (обычно задают только зазор).

Схема 4 (рис. 24). Отличается от схемы 3 только наличием участка ширины B. Формоизменение на участке A такое же, как по схеме 3. Усилие $P_{пр}$ прижима должно быть достаточным с самого начала формоизменения, чтобы не образовался прогиб заготовки (см. рис. 20, 21).

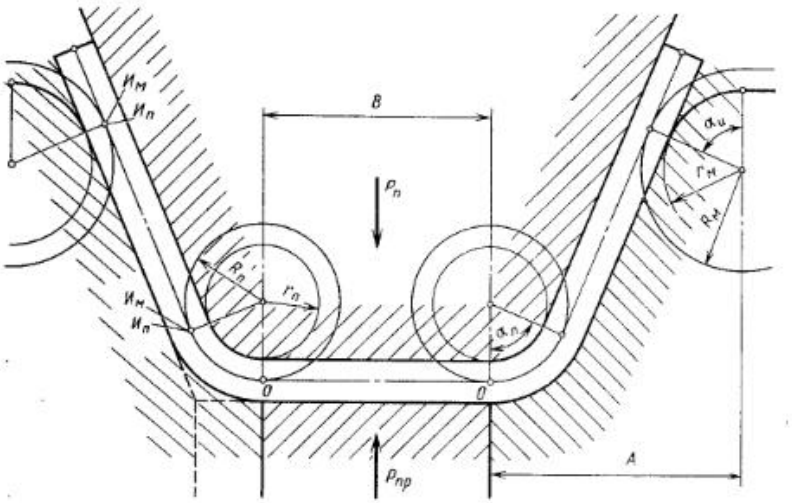


Рис. 24. Схема 4 гибки

Схема 5 (рис. 25). При $z = s$, $\alpha_и = \pi/2$ $A = R_п + R_м = r_п + r_м + s$. Формоизменение заготовки протекает так, как показано на рис. 19, до мгновения, когда точка K_1 выйдет на вертикаль $И_п И_м$ (рис. 26). При дальнейшем движении инструмента продолжается увеличение кривизны до $1/R_п$ на участке $ПМ$, сокращение этого участка, уменьшение кривизны на отрезке $МГ$ и упругое увеличение кривизны обратного направления на отрезке $ГК_1$ под воздействием силы $P_{п.к}$. Причем на одной части отрезка

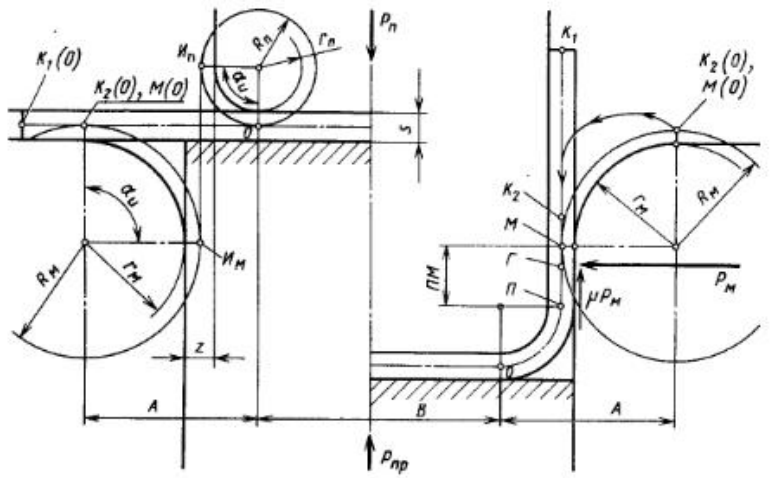


Рис. 25. Схема 5 гибки

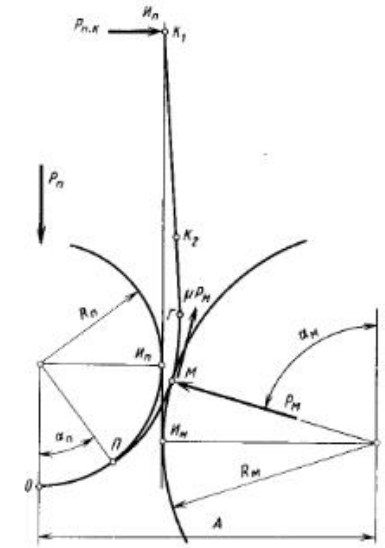


Рис. 26. Форма центральной линии $ОПК_1$ заготовки в мгновение, когда точка $К_1$ вышла на вертикаль $И_п И_м$

$МГ$, со стороны точки $М$, кривизна уменьшается упругопластически и пластически, а на другой части — упруго. Так продолжается до мгновения, когда точка $И_п$ займет положение точки $И_м$. Затем продолжается только спрямление на участке $МГ$ до тех пор, пока точка $И_м$ не достигает точки $Г$. После этого мгновения формоизменение заканчивается, т. е. дальнейшее продвижение пуансона в матрицу не вызывает формоизменения заготовки.

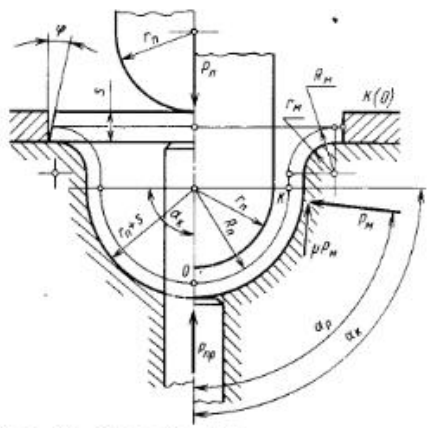


Рис. 27. Схема 6 гибки

Толщина s заготовки может изменяться в пределах допуска $\Delta = s_{max} - s_{min}$. При изготовлении штампа размер z может быть подогнан без зазора по толщине s_{max}. Для компенсации отклонений толщины может быть предусмотрено: 1) зазор $\Delta z = \Delta$, $z = s_{min} + \Delta z$; 2) упругий элемент в конструкции матрицы или пуансона, дающий возможность увеличивать зазор z от его минимального значения $z = s_{min}$ под воздействием силы $P_м$, не вызывая существенного увеличения этой силы. Наличие зазора существенно меняет заключительный этап формоизменения. В частности, зазор может быть такой величины, что формоизменение закончится прежде, чем точка $К$ выйдет на линию $И_п И_м$ несмотря на дальнейшее продвижение пуансона в матрицу. Компенсация отклонений толщины заготовки за счет зазора приводит к снижению точности детали из-за большого разброса отклонения угла α от номинального значения, равного $\pi/2$.

Схема 6 (рис. 27). Деталь представляет собой полукольцо, $\alpha_к = \pi/2$. Рабочие поверхности пуансона и матрицы в сечении представлены дугами радиусов $r_п$ и $r_п + s$. На заключительной стадии, когда кривизна меняется в основном за счет сдвиговой деформации, торцовые плоскости заготовки, в которых находятся точки $К$, искажаются и поворачиваются. Чтобы у детали эти торцовые поверхности находились примерно по нормали к центральной линии, в заготовке они должны быть выполнены под углом

$$\varphi \approx \operatorname{arctg}(0{,}7s/r_п). \qquad (80)$$

Заготовку укладывают в штамп на зеркало матрицы, если выполняется неравенство

$$r_м/s < (\pi/2 - 1) \times \times (R_п/s) - 1/2. \qquad (81)$$

Например, при $R_п/s = 10$ $r_м/s < 5{,}2$; при $R_п/s = 5$ $r_м/s < 2{,}4$. Отношение $r_м/s$ может быть больше единицы, если $R_п/s > 3/(\pi - 2)$. При $r_м/s < 1$ схему 6 не применяют.

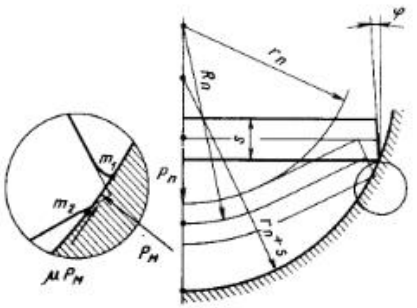


Рис. 28. Схема смятия угла заготовки

В случае, когда $\alpha_к < \pi/2$, должно выполняться неравенство

$$R_м/s < (R_п/s)(\alpha_к/\sin\alpha_к - 1). \qquad (82)$$

При несоблюдении этих неравенств заготовка контактирует с полостью матрицы на каком-либо ее участке радиуса $r_м$ или $r_п + s$ (рис. 28) своими торцовыми углами с самого начала формоизменения. Углы сминаются под действием контактных сил.

При гибке по схемам 1, 3 и 6 прижимное устройство матрицы необходимо для того, чтобы предотвратить скольжение заготовки по поверхности ее контакта с пуансоном в начальный период формоизменения, когда угол α еще невелик. Если прижимного устройства нет или же усилие $P_{пр}$ недостаточно, скольжение возникает из-за появления поперечной по отношению к силе $P_п$ силы вследствие нестабильности сил трения на контактных поверхностях заготовки с матрицей и нарушения симметрии действия на заготовку как сил $\mu P_м$, так и сил $P_м$.

Схема 7 (рис. 29). Матрица движется вверх относительно пуансона. Матрица имеет прижимное устройство и пару гибочных колодок с рабочими поверхностями $О'К'$ (в исходном положении $О'(0)К'(0)$). В начале рабочего хода прижимное устройство, приблизившись к пуансону, прижимает заготовку к поверхности $О_п О_п$ пуансона с усилием $P_{пр}$ и останавливается, а нажимные гибочные колодки продолжают движение, приводящее к наматыванию заготовки на пуансон. Для того чтобы колодка не скользила по заготовке, геометрический отрезок $ОК_г$ [в исходном положении $О(0)К_г(0)$], кинематически жестко связанный с материальным отрезком $О'К'$, должен обкатываться без скольжения по дуге окружности радиуса $R_п$. Тогда геометрические точки отрезка $ОК_г$ движутся вместе с материальными точками волокна $ПК$ по эвольвентам относительно окружности радиуса $R_п$. Если же точки отрезка $ОК_г$ движутся не по эвольвентам, они смещаются относительно материальных точек в направлении линии $ОК$. На площадке $m_1 m_2$ силового контакта возникает скольжение и сила трения. Движение обкатки

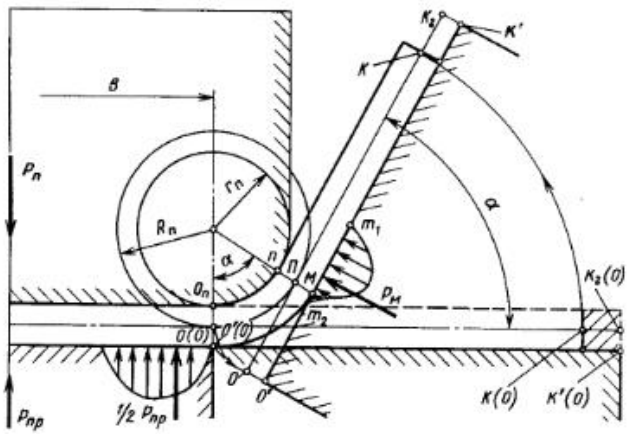


Рис. 29. Схема 7 гибки

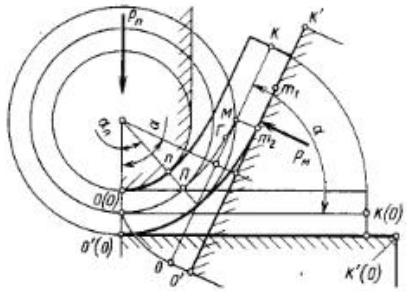


Рис. 30. Появление участка $ПМ$ переменной кривизны при недостаточной силе $P_м$

геометрической линии $ОК_г$ по дуге радиуса $R_п$ может быть обеспечено, например, при использовании в конструкции матрицы неподвижного относительно пуансона зубчатого сектора, имеющего делительную окружность радиуса $R_п$, и рейки с делительной линией $ОК_г$, закрепленной на поворотном устройстве.

Если действует достаточная сила $P_м$, участок $ПК$ прямолинейный. Силовой контакт имеет место только на части m_1m_2 поверхности $O'K'$. На другом участке m_1K' может даже образоваться клиновидный, сходящийся к точке m_1 зазор между поверхностями заготовки и матрицы. Если же сила $P_м$ недостаточна, образуется участок $ПМ$ переменной кривизны изгиба (рис. 30). Аналогичный участок переменной кривизны может образоваться и в зоне действия прижимного устройства, если недостаточна сила $P_{пр}$.

Схема 8 (рис. 31). Заготовка толщиной s заталкивается пуансоном через канал такой же номинальной ширины в полость матрицы с поверхностью радиуса $r_м$. Мгновенные положения *1—5* заготовки, находящейся в полости, дают приблизительную картину ее формоизменения. В первом положении находящийся в матрице участок имеет переменную кривизну.

Отрезок $КГ$ центральной линии изогнут упруго, отрезок $ГО$ — упругопластически и пластически. Кривизна линии увеличивается от точки $Г$ к точке $О$. Наибольшее значение кривизна имеет в сечении $а—а$. Изгибающий момент, возникающий от контактных сил $P_м$ и $\mu P_м$, воспринимается верхней частью канала матрицы, расположенной ниже сечения $а—а$ (см. рис. 31). Здесь на обе стенки канала действуют значительные нормальные давления и силы трения. На рис. 31 показаны их равнодействующие реакции стенки матрицы на заготовку: $P_{1м}$, $\mu P_{1м}$ и $P_{2м}$, $\mu P_{2м}$. Торцовый угол заготовки сминается подобно тому, как это изображено на рис. 28.

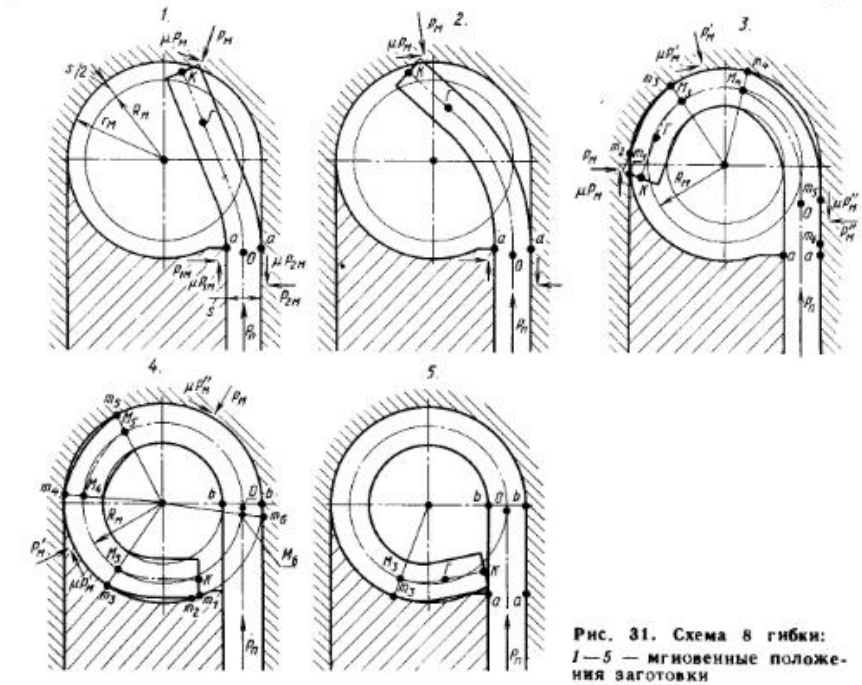


Рис. 31. Схема 8 гибки: *1—5* — мгновенные положения заготовки

При дальнейшем продвижении заготовки в полость матрицы (положение *2*) кривизна на участке $КО$ везде увеличивается, отрезок $КГ$ упругого изгиба сокращается. Затем, по мере продвижения заготовки в матрицу и увеличения кривизны участка $КО$, сечение, в котором кривизна имеет наибольшее значение, уходит вверх от сечения $а—а$. В положении *3* показано, что точка $О$, ограничивающая снизу пластическую область изгиба, находится уже ближе к диаметральной линии полости, чем к сечению $а—а$. Теперь все контактные силы действуют в полости матрицы на контактных площадках m_1m_2, m_3m_4 и m_5m_6; контактные силы на площадке m_1m_2 могут быть относительно малы и даже равны нулю. Кривизна центральной линии $КО$ переменная. Только на отрезке M_3M_4 она приняла постоянную кривизну $1/R_м$. В положении *4* точка $О$, ограничивающая пластическую область снизу, располагается вблизи от диаметрального сечения $b—b$. Протяженность пластической области над точкой $О$ относительно невелика, составляет $(1 \div 1{,}5)\,s$. Центральная линия приняла постоянную кривизну на отрезках M_3M_4 и M_5M_6, там, где имеется контакт заготовки с матрицей. На этом этапе формоизменения отрезок M_4M_5, на котором заготовка не контактирует с матрицей, сокращается, а когда торец заготовки дойдет до упора (положение *5*), это сокращение ускоряется. Отрезок исчезает, если усилие $P_п$ может быть доведено до требуемого для этого значения. Но усилие $P_п$ не должно превышать того значения, при котором в сечении $а—а$ будет превзойден предел текучести материала на сжатие. Концевой участок $КМ_3$ не может быть доведен до кривизны $1/R_м$ за счет повышения усилия $P_п$. Чтобы и здесь получить требуемую кривизну, обычно вводят предварительную операцию подгибки конца на другом штампе, например, по схеме, представленной на рис. 32.

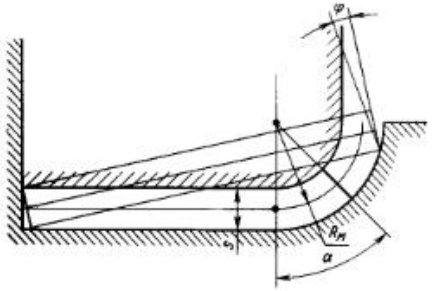


Рис. 32. Предварительная операция подгибки конца заготовки, изгибаемой по схеме 8

Расстояние между линиями действия сил $P_{1м}$ и $P_{2м}$ зависит от зазора между поверхностями канала и заготовки и тем больше, чем больше зазор. При нулевом зазоре это расстояние составляет $(1{,}5 \div 2{,}5)\,s$.

Толщина s детали получается неравномерной. На концевом участке вблизи точки $К$ она равна исходной, если отсутствует предварительная операция подгибки, и может быть меньше исходной, если она есть. По мере удаления рассматриваемого поперечного сечения от торцового сечения толщина увеличивается, и наибольшее значение она имеет в сечении $b—b$. Соответственно увеличению толщины сокращается длина средней линии. Это сокращение можно приближенно учесть, принимая среднее по ходу гибки значение параметра a. Согласно данным Г. А. Смирнова—Аляева и Д. А. Вайнтрауба, значение a зависит в основном от кривизны изгиба:

ρ_0/s (0)	0,5	0,6	0,8	1,0
a/s (0)	0,7	0,67	0,63	0,59
ρ_0/s (0)	1,2	1,5	1,8	2
a/s (0)	0,56	0,52	0,5	0,5

Схема 9 (рис. 33). Заготовка толщиной s проталкивается пуансоном через канал с таким же номинальным

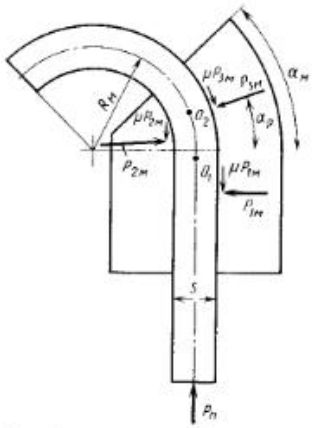


Рис. 33. Схема 9 гибки

размером поперечного сечения. Канал имеет два участка: первый — прямой, второй — изогнутый. На первом участке задаются положение и направление движения заготовки. При прохождении второго участка меняется форма заготовки. Основной вклад в формоизменение вносит деформация сдвига. Деформация в материальном сечении начинается при подходе этого сечения к границе второго участка канала (точка O_1) и заканчивается в точке O_2; $O_1O_2 = (1 \div 1{,}5)\,s$. На поверхностях контакта действуют нормальные давления и силы трения; их равнодействующие — $P_{1м}$; $\mu P_{1м}$; $P_{2м}$; $\mu P_{2м}$; $P_{3м}$ и

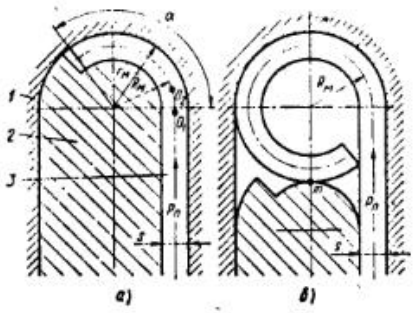


Рис. 34. Последовательность движений в штампе, работающем по схеме 9:
а — этап формоизменения по схеме 9; *б* — этап формоизменения по схеме 8; *1* — матрица; *2* — вставка; *3* — заготовка

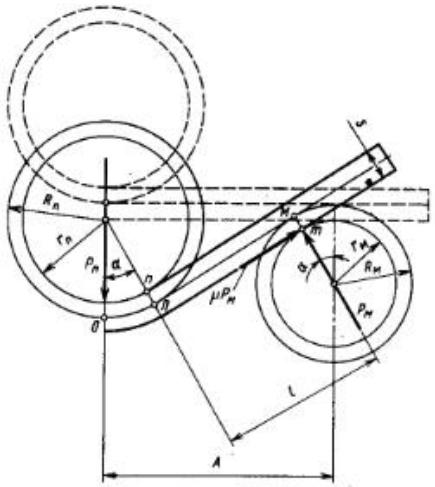


Рис. 35. Расчетная схема действия сил

$\mu P_{3м}$. На стабильность формоизменения значительно влияет точность заготовки.

Схема работы штампа для изготовления детали типа «петля» показана на рис. 34. Вначале (рис. 34, *а*) формоизменение идет в основном за счет сдвиговой деформации при проталкивании заготовки через канал (см. рис. 33). Затем, при $\alpha > \pi/2$, схема нагружения меняется. Нагрузку, необходимую для формоизменения, целиком принимает на себя поверхность радиуса $r_м$, в то время как рабочая поверхность канала разгружается. Вставка выводится, и формоизменение завершается без нее (рис. 34, *б*). Ее поверхность, расположенная около точки m, может не иметь силового контакта с заготовкой при ее формоизменении до того мгновения, когда торец заготовки дойдет до упора. После этого мгновения, если сила $P_п$ будет нарастать и дальше, поверхность около точки m служит дополнительной опорой, препятствующей дальнейшему изменению формы заготовки.

Расчет сил взаимодействия заготовки со штампом. *Схемы гибки 1 и 2.* Принимают упрощенную расчетную схему (рис. 35), при которой $\alpha_п = \alpha_м = \alpha$, длина плеча l отвечает

равенству (76). Если $l/s \geqslant 5$, внешний изгибающий момент

$$M = P_м l + \mu P_м s/2 \qquad (83)$$

можно приравнять моменту внутренних сил, найденному без учета влияния на него сил $P_м$ и $\mu P_м$, т. е.

$$M = M_z. \qquad (84)$$

Тогда

$$P_м = M_z/(l + \mu s/2); P_п = 2M_z(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)/(l + \mu s/2), \qquad (85)$$

где μ — коэффициент трения.

При гибке возникают относительно высокие контактные напряжения и силы трения. В условиях упругого контакта заготовки с опорными поверхностями матрицы $\mu \approx 0{,}1$ при работе со смазочным материалом и $\mu \approx 0{,}15$ — без смазочного материала. В условиях пластического контакта $\mu = 0{,}15 \div 0{,}20$ при работе со смазочным материалом и $\mu = 0{,}20 \div 0{,}25$ — без смазочного материала. Момент M_z определяют по табл. 1 и по формулам (14)—(16) при подстановке $\rho_ц = R_п$. При вычислении сил следует учитывать, что кривизна $1/R_п$ и расчетный момент внутренних сил достигаются при $\alpha \approx 10 \div 15$.

Сила $P_м$ имеет максимум при $\alpha = \alpha_m$ (78), а сила $P_п$ при $\alpha = \alpha_{mn}$.

Если принять $\mu = 0$, то

$$\alpha_{mn} = \arcsin[(A - \sqrt{A^2 - (R_п + R_м)^2})/(R_п + R_м)], \qquad (86)$$

причем

$$P_п = (2M_z\cos^2\alpha)/[A - (R_п + R_м)\sin\alpha]. \qquad (87)$$

В частности, при $A = R_п + R_м$, $l_{min} = 0$, $\alpha_{mn} = \pi/2$ имеем $P_п = 2M_z(1 + \sin\alpha)/(R_п + R_м)$, и когда в процессе формоизменения угол α достигает значения $\pi/2$, сила $P_п = 4M_z/(R_п + R_м)$. Однако приведенные формулы справедливы только при $l/s \geqslant 5$. Например, при $r_п + r_м = 6s$ $A = R_п + R_м = r_п + r_м + s = 7s$, и согласно (77) $l \geqslant 5s$ при $\alpha \leqslant 19°$. Когда угол α увеличивается от 19 до 45°, значение l/s сокращается от 5 до 3.

Если $l/s < 5$, формулы (84), (85) можно использовать только как ориентировочные до $l/s = 3$, учитывая, что расчетные значения $P_м$ и $P_п$ будут завышены. При дальнейшем сокращении отношения l/s сила $P_м$ вызывает пластический сдвиг и приближается к предельному значению $P_{сд}$ (59). Формулы (85) принимают вид

$$P_м = P_{сд};$$

$$P_п = 2P_{сд}(\cos\alpha + \mu\sin\alpha). \qquad (88)$$

Силу $P_{пр}$ прижимного устройства (*схемы 2, 4, 5, 7*), необходимую для предотвращения прогиба f, вычисляют по формуле

$$P_{пр} \geqslant 2P_{сд}. \qquad (89)$$

При гибке по *схемам 3 и 4* формулы (85), (88) могут быть использованы для первого и второго этапов формоизменения. На третьем этапе на одной части отрезка $ПМ$ продолжается изгиб, на другой — разгиб; на отрезке $МК$ (см. рис. 23) наблюдается перегиб. Сила $P_м$, необходимая для изгиба сдвигом при относительно малом плече, может быть принята равной $P_{сд}$. Дополнительное силовое воздействие $\Delta P_м$, необходимое для упомянутых разгиба и перегиба, можно приблизительно оценить как

$$\Delta P_м = (0{,}2 \div 0{,}3)\,P_{сд}. \qquad (90)$$

Причем необходима еще сила для выравнивания кривизны на участке $ОП$ и доведения ее до $1/R_п$, если в начале процесса образовалась неравномерная кривизна (см. рис. 17, 18). Ориентировочно эта сила равна $2P_{сд}$. Таким образом, при гибке по *схеме 3*

$$P_п \approx 2{,}6P_{сд}(\cos\alpha_п + \mu\sin\alpha_п), \qquad (91)$$

а при необходимости выравнивать кривизну на участке $ОП$

$$P_п \approx 2{,}6P_{сд}(\cos\alpha_п + \mu\sin\alpha_п) + 2P_{сд}. \qquad (92)$$

При гибке по *схеме 4* суммарную силу на пуансоне в конце формоизменения определяют по формуле (91) с учетом силы $P_{пр}$ (89).

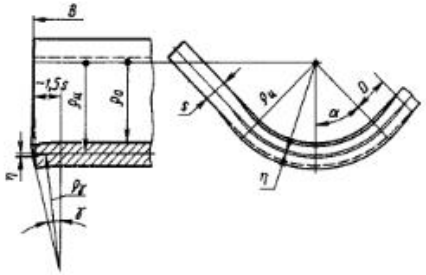


Рис. 36. Искажение формы прямоугольного поперечного сечения заготовки

Прямоугольная форма поперечного сечения заготовки при гибке по *схемам 1—4* искажается (рис. 36). Радиус кривизны краевой искаженной зоны

$$\rho_\gamma \approx 2\rho_{\text{ц}}. \qquad (93)$$

При $B \geqslant 4s$

$$\eta \approx \rho_\gamma (1 - \cos\gamma), \qquad (94)$$

где $\gamma \approx 1{,}5s/\rho_\gamma$.

При $B < 4s$ значение η увеличивается по сравнению с найденным по формуле (94) на 20—30 %.

При $B \leqslant s$ формоизменение поперечного сечения заготовки соответствует схеме, приведенной на рис. 6. Расстояние, на которое распространяется искажение за зону гибки, $D = (1{,}5 \div 2)\,s$.

Для выравнивания формы поперечного сечения искаженный участок заготовки необходимо сжать между рабочими поверхностями инструмента с усилием

$$P_\rho = 2\sigma_{\text{в}}\,[0{,}3es/(n\,(\rho_0 + s))]^n s \times \times\,(\rho_0 + s)\sin\alpha, \qquad (95)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ — временное сопротивление; n — показатель степени кривой упрочнения; e — основание натурального логарифма.

При гибке по *схеме 5* силу $P_{\text{п}}$ в начальный период формоизменения определяют по формуле (85), затем по формуле (88), и в конце формоизменения при $\alpha_{\text{п}} = \pi/2$, с учетом $P_{\text{пр}}$ (89), суммарная сила на пуансоне при $z = s$

$$P_{\text{п.с}} \approx 2{,}6\mu P_{\text{сд}} + P_{\text{пр}}. \qquad (96)$$

Если $z = s + \Delta z$ и правки выравнивания кривизны на участке $\Pi\Gamma$ не требуется, сила $P_{\text{п}} = 2\mu P_{\text{сд}}$.

При гибке по *схеме 6* силы $P_{\text{м}}$ и $P_{\text{п}}$ в начальный период формоизменения определяют по формулам (85), а в конце формоизменения по (88) при подстановке $\alpha = \alpha_P \approx 0{,}9\alpha_{\text{к}}$ (см. рис. 27). Если в начале формоизменения на отрезке $O\Pi$ имел место неравномерный изгиб, к значению $P_{\text{п}}$, найденному по формуле (88), добавляют силу, равную $2P_{\text{сд}}$ (для выравнивания кривизны на этом отрезке); для выравнивания формы поперечного сечения необходимо также учитывать силу P_ρ (95).

При гибке по *схемам 1, 3 и 6* нестабильность сил трения и возникающее при этом отклонение от оси симметрии горизонтальных составляющих сил, действующих на заготовку, должно быть сбалансировано. Для этого предусматривают фиксирующее технологическое отверстие на заготовке и штырь на пуансоне, расположенные по оси симметрии этих сил, или прижимное устройство. При наличии прижимного устройства сила $P_{\text{пр}}$ прижима должна быть больше $P_{\text{м}}$.

Схема 7. Для того чтобы участок ΠM заготовки (рис. 30) был равен нулю (см. рис. 29), должно быть

$$P_{\text{м}} \geqslant P_{\text{сд}}.$$

При условии, что движение точек O и $K_{\text{г}}$ осуществляется по эвольвентам и на поверхностях силового контакта m_1m_2 силы трения не возникают, имеем

$$P_{\text{п}} = 2P_{\text{м}}\cos\alpha \geqslant 2P_{\text{сд}}\cos\alpha. \qquad (97)$$

Пуансону необходимо также преодолеть силу $P_{\text{пр}}$, поэтому суммарная сила на пуансоне

$$P_{\text{п. с}} \geqslant 2P_{\text{сд}}\cos\alpha + 2P_{\text{сд}} = = 2P_{\text{сд}}(1 + \cos\alpha). \qquad (98)$$

В начале рабочего хода $\alpha = 0$. Если упомянутое условие движения не выполняется, возникают силы трения, равные примерно $\mu P_{\text{сд}}$ на каждой площадке m_1m_2, причем их направление зависит от траектории движения точек $OK_{\text{г}}$. Если траектория движения точки $K_{\text{г}}$ проходит с выпуклой стороны эвольвенты, исходящей из точки $K_{\text{г}}$ (0), проекция $\mu P_{\text{сд}}\sin\alpha$ силы трения на направление силы $P_{\text{п}}$ суммируется с проекцией $P_{\text{сд}}\cos\alpha$ и следовательно

$$P_{\text{п}} = 2P_{\text{сд}}\cos\alpha + 2\mu P_{\text{сд}}\sin\alpha,$$

а если с вогнутой — вычитается, т. е.

$$P_{\text{п}} = 2P_{\text{сд}}\cos\alpha - 2\mu P_{\text{сд}}\sin\alpha.$$

Схема 8. По мере того, как заготовка продвигается в матрицу и точка O на нижней границе области пластической деформации поднимается к сечению b—b, усилие $P_{\text{п}}$ заталкивания заготовки в матрицу увеличивается до

$$P_{\text{п}} \cong (1 + \mu)\,M_z/R_{\text{м}}. \qquad (99)$$

В последующий период, когда точка O находится вблизи сечения b—b, усилие $P_{\text{п}}$ почти не изменяется. Но как только торец заготовки дойдет до упора (положение 5, см. рис. 31), усилие резко возрастает. Возрастание $P_{\text{п}}$ должно быть ограничено значением, при котором сжимающее напряжение в заталкиваемой части заготовки достигает предела текучести.

Схема 9. Равнодействующие давлений заготовки на поверхность канала $P_{1\text{м}} \simeq P_{3\text{м}} \simeq P_{2\text{м}}/2 \simeq P_{\text{сд}}$;

$$P_{\text{п}} \cong P_{\text{сд}}\,[\sin\alpha_P + \mu\,(3 + \cos\alpha_P)]; \qquad (100)$$

$$\alpha_P \simeq 0{,}7s/R_{\text{м}}.$$

В штампе (рис. 34) на первом этапе формоизменения (рис. 34, *а*) силу $P_{\text{п}}$ определяют по формуле (100), а на втором этапе (рис. 34, *б*) — по формуле (99); рост силы $P_{\text{п}}$ после завершения формоизменения должен быть ограничен.

Пружинение детали при раскрытии штампа. Упругое изменение формы (пружинение) отштампованной детали при раскрытии штампа заключается в изменении кривизны участков, подвергнутых гибке, и углов, в растворе которых они лежат. Изменение кривизны участков детали, для которых может быть принято допущение в круговой гибке, определяют по формулам (62), (63) при подстановке $\rho_{\text{ц}} = R_{\text{п}}$ или $\rho_{\text{ц}} = R_{\text{м}}$, а изменение угла —

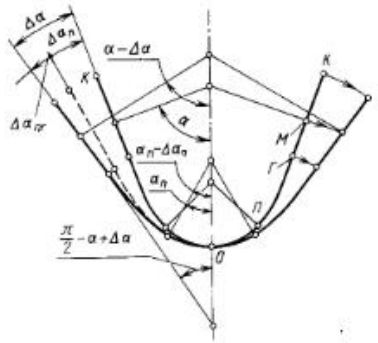


Рис. 37. Изменение формы центральной линии заготовки при разгрузке после штамповки по схемам 1 и 2

по формуле (65). По заданной кривизне детали, т. е. по заданной остаточной кривизне, кривизну инструмента (в нагруженном состоянии) подсчитывают по формуле (63). Пружинение на участках некруговой гибки, на которых изгибающий момент и кривизна являются функциями координат точки, может быть найдено численно по формулам (61), (64), (66).

Схема разгрузочного изменения формы центральной линии заготовки при штамповке по схеме *1* дана на рис. 37. На участке $O\Pi$ постоянной кривизны ($1/\rho_{\text{ц}} = 1/R_{\text{п}}$) кривизну после разгрузки $1/\rho_{\text{ц.о}} = 1/R_{\text{п}} - 1/\rho_{\text{ц.р}}$ определяют по формуле (62), приращение $\Delta\alpha_{\text{п}}$ определяют по формуле (65). На участке $\Pi\Gamma$ переменной кривизны форму центральной линии определяют численно. Причем приращение $\Delta\alpha$ представляет сумму, состоящую из приращения $\Delta\alpha_{\text{п}}$ и приращения $\Delta\alpha_{\text{пг}}$. Последнее является углом поворота нормали к центральной линии в точке Π относительно нормали в точке Γ (при разгрузке заготовки) (см. рис. 37)

$$\Delta\alpha_{\text{пг}} = \Delta\theta_k,$$

где $\Delta\theta_k$ — определяют по формуле (66).

Прямыми на детали получаются только участки ΓK. Заданную точность угла между ними, равного $2\,(\pi/2 - \alpha + \Delta\alpha)$, обычно обеспечивают подбором рабочего хода при настройке штампа. В случае, когда на участке $O\Pi$ имеет место неравномерный

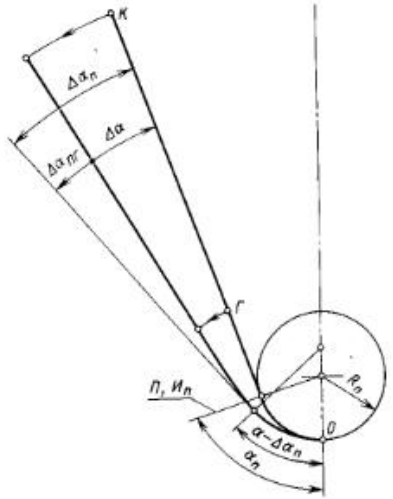


Рис. 38. Изменение формы центральной линии заготовки при разгрузке после штамповки по схемам 3 и 4

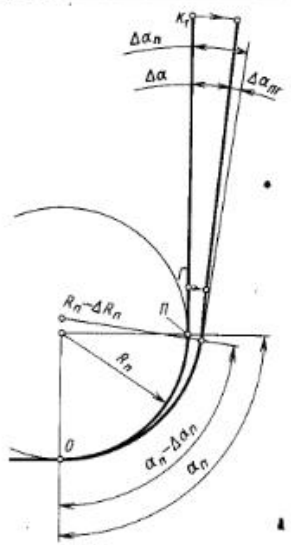


Рис. 40. Изменение формы центральной линии заготовки при разгрузке после штамповки по схеме 5

изгиб (см. рис. 17, 18), влияние относительно небольшого участка $ОП_0$ в общее изменение формы центральной линии при разгрузке заготовки можно не учитывать.

Разгрузочное изменение формы центральной линии при штамповке по схемам *3* и *4* показано на рис. 38.

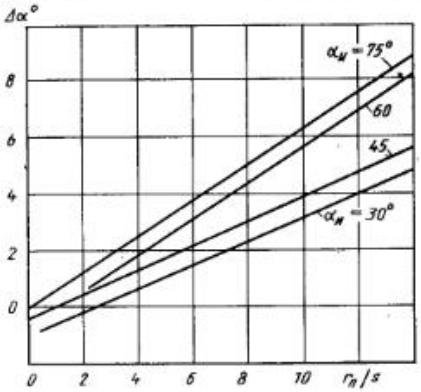


Рис. 39. Зависимость угла $\Delta\alpha$ пружинения от отношения $r_п/s$ для различных углов $\alpha_и$ гибки при штамповке по схемам 3 и 4 (экспериментальные данные для стали 20)

На участке $ОП$ $1/\rho_ц = 1/R_п$; кривизну $1/\rho_{ц.о}$ определяют по формуле (62). Приращение $\Delta\alpha_п$ определяют по формуле (65). Приращение $\Delta\alpha_{пг}$ имеет обратное по отношению к приращению $\Delta\alpha_п$ направление. В процессе штамповки участок $ПГ$ сначала претерпел некруговой изгиб, затем спрямление, после чего снова искривился при разгрузке.

Экспериментальные значения угла пружинения $\Delta\alpha = \Delta\alpha_п - \Delta\alpha_{пг}$ представлены на рис. 39.

Разгрузочное изменение формы центральной линии при штамповке по схеме *5* показано на рис. 40. Приращение $\Delta\alpha_п$ определяют по формуле (65). Приращение $\Delta\alpha_{пг}$ имеет обратное по отношению к приращению $\Delta\alpha_п$ направление и возникает от того, что в процессе штамповки ранее изогнутый, а затем спрямленный участок $ПГ$ при разгрузке принимает остаточную кривизну. При $r_п/s > 2$ участок $ПГ$ мал по сравнению с участком $ОП$, поэтому его влиянием на угол пружинения можно пренебречь.

Форма и кривизна опорных поверхностей матрицы и расстояние между ними, протяжённость поверхностей для правки остаточной кривизны. *Схемы 1 и 2* (см. рис. 14 и 19). При выборе формы и кривизны опорных поверхностей матрицы и расстояния между ними следует исходить из двух требований к детали: 1) недопустимость следов пластического вдавливания и вызванного ими уменьшения толщины материала; 2) протяженность отрезка $ПГ$ остаточной кривизны не должна выходить за пределы заданной.

В штампах для гибки листового (полосового) металла опорные поверхности выполняют цилиндрическими (круговыми и некруговыми), а для гибки стержней — в виде поверхностей, меридианное сечение которых соответствует поперечному сечению стержня. Максимальное контактное нормальное напряжение (по Герцу)

$$\sigma_H = 0{,}59\sqrt{P_м E_1 E_2/(Br_м(E_1+E_2))}, \quad (101)$$

где E_1, E_2 — модули упругости металлов контактирующих тел; B — ширина листовой заготовки.

По условию отсутствия пластического вдавливания

$$\sigma_H \leqslant \sigma_{Hд}. \quad (102)$$

Допустимое напряжение при упругом контакте

$$\sigma_{Hд} \approx (1{,}7 \div 2)\,\sigma_т. \quad (103)$$

Относительная протяженность отрезка $ПГ$ остаточной кривизны

$$ПГ/ПМ \approx 1 - M_{zy}/M_z, \quad (104)$$

где M_z — изгибающий момент для сечения в точке $П$; $M_{zy} = \sigma_т s^2/6$ — изгибающий момент для сечения в точке $Г$.

Относительная протяженность отрезка $ПГ$ зависит от кривизны в точке $П$ и свойств металла заготовки.

Если длина отрезка $ПМ$ $l_{min} \geqslant 5s$ и радиус кривизны опорных поверхностей $r_м \geqslant (4 \div 5)\,s$, пластического вдавливания практически не возникает; при $l_{min} \gg 5s$ может быть принято $r_м < 4s$. Выбранные так значения l_{min} и $r_м$ должны быть проверены расчетом по формулам (101)—(103).

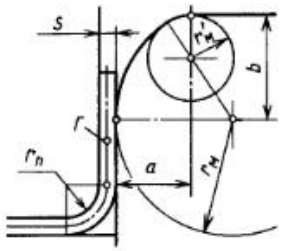
Затем по формуле (104) можно определить относительную протяженность отрезка $ПГ$. При вычислении должно быть учтено, что изгибающий момент M_z достигает значения, соответствующего кривизне $1/R_п$, когда угол $\alpha = 10 \div 15°$. Если гибка заканчивается при $\alpha_и > \alpha_m$, вместо l_{min} принимают значение $ПМ = l$ (76) при заданном значении $\alpha = \alpha_и$.

Схемы 3 и 4 (см. рис. 22 и 24). Эти схемы применяют вместо схем *1* и *2*, если соответствующим выбором l_{min} и $r_м$ при гибке по схемам *1* и *2* может быть удовлетворено первое требование к детали, но не удовлетворяется второе, в частности, когда за пределами участка $ОП$ гибки остаточная кривизна недопустима.

Участок матрицы $u_м u_м$ предназначен для правки остаточной кривизны; его протяженность можно определять, если заданы параметры A, l_{min}, $r_м$, удовлетворяющие поверочному расчету. Причем, если его длина оказалась значительно больше длины отрезка $ПГ$, соответствующий участок $u_п u_п$ пуансона можно выполнить двухступенчатым. Первая степень — рабочая, сопрягаемая с поверхностью радиуса $r_п$, и имеет протяженность, $ПГ$ равную $(3 \div 3{,}5)\,s$; вторая — нерабочая, не вступает в контакт с заготовкой, отдалена от поверхности заготовки на $(0{,}2 \div 0{,}5)\,s$.

Правка заготовки на отрезке $ПГ$ не устраняет полностью остаточную кривизну, поскольку отрезок $u_м u_м$ прямой. В результате при смыкании штампа обеспечивается лишь спрямление участка заготовки, а при размыкании появляется вторичная остаточная кривизна пружинения того же направления, что и первичная. Для полного устранения кривизны на отрезке $ПГ$ поверхности на участках $u_м u_м$ и $u_п u_п$ инструмента должны иметь кривизну обратного направления, равную остаточной вторичной кривизне.

Схема 5 (см. рис. 25). Если в схеме 2 выполняется условие $A = R_п + R_м$, отличие от нее схемы 5 состоит только в том, что на пуансоне и матрице вводят элементы поверхности, предназначенные для правки участка $ПГ$ заготовки. При входе пуансона



Вид	a	b	$r_м$	$r'_м$
1	6s	8s	10s	2,8s
2	4s	8s	13s	2,8s

Рис. 41. Виды сечений опорной поверхности матрицы, составленной из двух круговых поверхностей

в матрицу эти элементы поверхности движутся относительно друг друга в параллельных направлениях, проглаживают и спрямляют заготовку на указанном участке. Протяженность участка $ПГ$, а следовательно, ход проглаживания (см. рис. 25, участок $ПМ$) зависят от отношения $R_п/R_м$, а также от свойств металла заготовки. Длина отрезка $ПГ$ может быть найдена с помощью формулы (104) и геометрического построения. Ход проглаживания должен несколько превышать отрезок $ПГ$, т. е.

$$ПМ \approx ПГ + (1 \div 5)\, s.$$

Если при выбранной кривизне $1/R_м$ получается, что длина отрезка $OK_1(0) \leqslant A$, укладка заготовки концами на зеркало матрицы не обеспечивается, так как длина концевого участка $M(0)K_1(0) \leqslant 0$. В этом случае могут быть приняты опорные поверхности с переменной кривизной, в частности, состоящие из двух сопряженных поверхностей различной, но постоянной кривизны (рис. 41).

Схема 6. Кривизна $1/r_м$ опорных поверхностей геометрически связана с формой детали. Поверочным расчетом устанавливают, удовлетворяет ли заданным требованиям характер контакта заготовки с опорными поверхностями. Если это требование не удовлетворяется, подбирают другую схему гибки.

Схема 7. Если сила $P_м$ достаточна для того, чтобы на заготовке не было участка переменной кривизны (см. рис. 30, участок $ПМ$), силовой контакт заготовки с поверхностью поворотного устройства матрицы имеет место на контактной площадке протяженностью $m_1m_2 \leqslant (3 \div 4)\, s$ (см. рис. 29). Протяженность m_2K' всей поверхности может быть принята равной $5s$, причем она может оказаться меньше размера $ПК$.

Схема 8. Верхняя часть прямолинейного канала матрицы воспринимает изгибающий момент только в начальный период процесса формоизменения заготовки. При беззазорном продвижении заготовки по каналу контактные давления, возникающие здесь в этот период от воздействия изгибающего момента, распространяются на поверхность протяженностью $(3 \div 4)\, s$. Наличие зазора приводит к увеличению этой протяженности. С учетом влияния зазора, равного полю допуска на прокат нормальной точности, длину $L_м$ канала принимают не менее $(5 \div 6)\, s$.

Схема 9. Протяженность прямолинейной части канала принимают не менее $5s$, а угол $\alpha_м$, в растворе которого находится криволинейная часть канала, 30—40°. Стабильность процесса формоизменения существенно зависит от стабильности и величины зазора между поверхностями заготовки и канала. В связи с этим схема 9 гибки рекомендуется для использования при штамповке холоднотянутого материала.

4. ГИБКА НА ВАЛКОВЫХ МАШИНАХ

Валковые гибочные машины предназначены для гибки цилиндрических и конических оболочек из листового металла толщиной 1—150 мм. Обычно кривизна гнутых оболочек $s/R < 0{,}2$ ограничивается прочностью и жесткостью валков. Минимальная кривизна определяется возможностью получения остаточной кривизны при достаточном распространении вглубь сечения листа области пластической деформации под воздействием только изгибающего момента. При малой кривизне гибки, когда значительная часть сечения остается в упругом состоянии, упругое изменение кривизны (пружинение) при разгрузке больше, чем остаточная кривизна. Разброс пружинения от детали к детали становится неуправляемым.

Валковые машины имеют три или четыре рабочих валка. Четырехвалковые машины обладают более широкими технологическими возможностями, производительнее и удобнее в работе, чем трехвалковые.

У четырехвалковой машины (рис. 42) оси двух валков *1* и *2* расположены в одной, обычно вертикальной, плоскости. Валки приводные (ведущие), снабжены нажимным устройством, сообщают листовой заготовке силу, необходимую для ее продвижения в процессе гибки. Валки *3* и *4* гибочные, неприводные. При настройке машины на заданную кривизну гибки эти валки перемещаются. Ось каждого валка движется в плоскости, пересекающей плоскость приводных валков под углом γ, по линии, параллельной их осям, расположенной на расстоянии D от оси первого валка. В этих плоскостях оси гибочных валков устанавливают параллельно осям приводных валков, если изгибается цилиндрическая оболочка, и непараллельно, если оболочка коническая.

Для изготовления цилиндрической оболочки заготовка в виде листа подается в разведенные приводные валки *1* и *2* до упора в гибочный валок *3* (рис. 42, штриховая линия). Включается нажимное устройство, перемещающее валок *2*, приводные валки сводятся и зажимают лист. Включается настроечное устройство, перемещающее валок *4*. При этом лист изгибается до заданной кривизны в области контакта с валками *1* и *2*. Затем включается вращение приводных валков и производится гибка поданного в валки участка заготовки, вращение прекращается, валок *3* перемещается в рабочее положение, такое же, как у валка *4*, валок *4* отводится, после чего включается вращение в другую сторону. Вначале через валки проходит только что изогнутая часть, не претерпевающая формоизменения, а затем следующая часть заготовки, получая заданную кривизну. Гибку осуществляют в описанной последовательности, если заранее известно положение гибочных валков, при котором получается заданная кривизна с требуемой точностью. Если необходимо настроечное корректирование, гибку ведут за несколько проходов с реверсами и последовательным увеличением кривизны за каждый проход до заданной. Положение гибочных валков определяют по настроечным графикам.

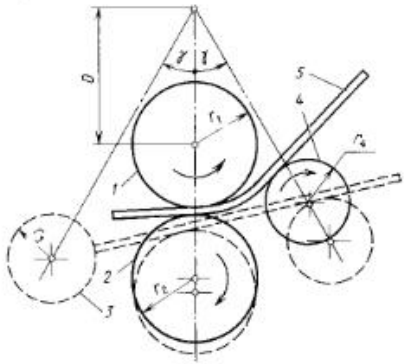


Рис. 42. Схема работы четырехвалковой гибочной машины:
1 и *2* — приводные валки; *3* и *4* — гибочные валки; *5* — заготовка (штриховой линией показаны положения валков и заготовки, когда неизогнутая заготовка вводится в валки)

Схемы нагружения и формоизменения. Схемы нагружения листа внешними силами и его формоизменения показаны на рис. 43.

На рис. 43, *а* показан случай, когда сила, развиваемая прижимным устройством приводных валков, недостаточна, а на рис. 43, *б* — достаточна для того, чтобы рабочие поверхности валков подошли друг к другу на расстояние, равное толщине листа.

Если плечо действия силы P_1 имеет достаточную относительную длину при гибке по схеме, показанной на рис. 43, влияние напряжений сдвига и угловых деформаций на пластическое состояние можно не учитывать. Внутренний изгибающий момент определяют по

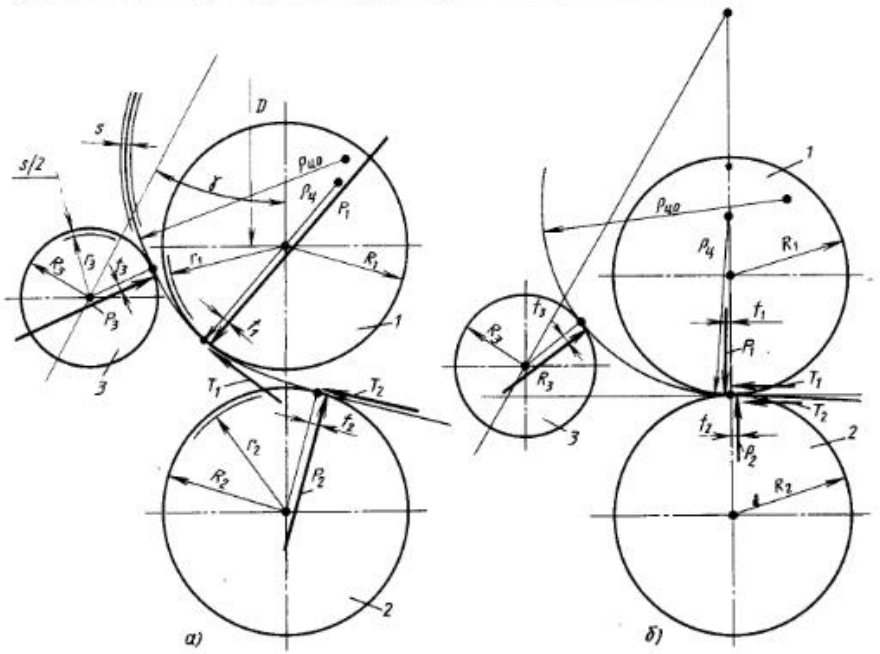


Рис. 43. Схемы нагружения листа внешними силами

формулам (14)—(16). Силы, действующие на площадках контакта листа с приводными валками, имеют нормальные P_1, P_2 и касательные T_1, T_2 составляющие, а на площадке контакта с гибочным валком — только нормальную составляющую P_3. Касательные составляющие в сумме дают силу T, необходимую для продвижения листа в валках при его гибке.

По мере продвижения материального поперечного сечения от площадки контакта листа с валком *2* к площадке контакта с валком *1* происходит увеличение внешнего изгибающего момента в этом сечении. Нагружение сечения от упругого переходит к упругопластическому и затем к пластическому. Кривизна листа принимает максимальное значение $1/\rho_{ц}$ при прохождении сечения под площадкой контакта, причем здесь она содержит в себе пластическую и упругую составляющие. При дальнейшем продвижении материального сечения от площадки контакта листа с валком *1* к площадке контакта с валком *3* изгибающий момент убывает, происходит упругая разгрузка сечения. Убывает упругая составляющая кривизны. Когда же сечение проходит над площадкой контакта листа с валком *3*, кривизна имеет только пластическую соетавляющую $1/\rho_{п.о}$, изгибающий момент и упругая составляющая кривизны принимают нулевые значения.

Изменение упругой составляющей кривизны при продвижении материального сечения от одной площадки контакта к другой необходимо учитывать при настройке машины на заданную пластическую составляющую кривизны изготовляемой оболочки.

Для единичного перемещения сечения листа в направлении центральной линии равенство нулю работы всех внешних и внутренних сил имеет вид

$$A = A(M_z) + A_{т.к} + A_{т.с} + A_{т.п}, \quad (105)$$

где A (M_z) — работа пластической деформации изгиба листа [см. формулы (31)—(33)];

$$A_{т.к} = P_1 f_1 / R_1 + P_2 f_2 R_2 + P_3 f_3 / R_3 \quad (106)$$

— работа трения качения валков по листу (f_1, f_2, f_3 — коэффициенты трения качения валков по листу);

$$A_{т.с} = n(\mu_{1c} P_1 + \mu_{2c} P_2) = nT \quad (107)$$

— работа трения скольжения поверхностей относительно друг друга на контактных площадках приводных валков с листом (n — коэффициент проскальзывания приводных валков; $n = 0{,}05 \div 0{,}1$);

$$A_{т.п} = \mu_1 P_1 R_{п1}/R_1 + \mu_2 P_2 R_{п2}/R_2 + \mu_3 P_3 R_{п3}/R_3 \quad (108)$$

— работа трения цапф радиусов $R_{п1}$, $R_{п2}$, $R_{п3}$ в опорных подшипниках скольжения;

$$A = M_1/R_1 + M_2/R_2 \quad (109)$$

— работа крутящих моментов M_1 и M_2, подаваемых на приводные валки.

Если радиусы приводных валков одинаковы, т. е. $R_1 = R_2$, то

$$A = (M_1 + M_2)/R_1 = M/R_1; \quad M = M_1 + M_2. \quad (110)$$

При $f_1 = f_2 = f_3 = f$, $\mu_{1c} = \mu_{2c} = \mu_c$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$ суммарный крутящий момент

$$M = A(M_z) R_1 + (f + n\mu_c)(P_1 + P_2) + fP_3 R_1/R_3 + \mu(P_1 R_{п1} + P_2 R_{п2} + P_3 R_{п3} R_1/R_3). \quad (111)$$

Коэффициент трения качения валков по горячекатаному стальному листу составляет $f \approx 0{,}8$; из цветного металла $f \approx 0{,}3 \div 0{,}4$. Коэффициент трения скольжения для листа из горячекатаной стали $\mu_c \leqslant 0{,}2$, для холоднокатаного листа $\mu_c \leqslant 0{,}12$; $\mu = 0{,}05 \div 0{,}08$ — коэффициент трения в обычных опорных подшипниках скольжения с бронзовыми вкладышами (по данным Е. Н. Мошнина).

Мощность привода валков

$$N = M\omega, \quad (112)$$

где ω — угловая скорость

Силы P_1, P_2, P_3, знание которых необходимо для расчетов валков на прочность и жесткость и определения потерь на трение, вычисляют по упрощенной расчетной схеме (рис. 44, *а*, *в*), в которой кривизна центральной линии листа на участке, находящемся в валках, принимается постоянной. Силу T вычисляют по формуле

$$T = T_1 + T_2, \quad (113)$$

где $T_1 = \mu_c P_1$; $T_2 = \mu_c P_2$.

Для удобства расчета силы P_1, P_2, P_3 принимают сосредоточенными по образующим контактирующих цилиндрических поверхностей.

При заданных параметрах машины (R_1, R_2, R_3, D, γ) различным комбинациям значений параметров настройки b и B может соответствовать одна и та же кривизна $1/\rho_{ц}$ изгибаемой оболочки. Если же кривизна $1/\rho_{ц}$ и параметр b заданы, другие геометрические параметры принимают определенные значения; их вычисляют по формулам для косоугольного треугольника в следующей последовательности. Сначала определяют углы

$$\cos\alpha_2 = [(\rho_{ц} + R_2)^2 + (\rho_{ц} - R_1)^2 - b^2]/(2 \times (\rho_{ц} + R_2)(\rho_{ц} - R_1)];$$

$$\cos\beta_2 = [b^2 + (\rho_{ц} + R_2)^2 - (\rho_{ц} - R_1)^2]/(2b(\rho_{ц} + R_2)];$$

$$\varphi_2 = \alpha_2 + \beta_2.$$

Теперь для треугольника со сторонами C, D, E (см. рис. 44) известны стороны D и $E = \rho_{ц} - R_1$ и угол φ_2 между ними. Вычисляют его сторону C и угол θ_2. После чего рассматривают треугольник со сторонами A, B и C. В нем известна сторона $A = \rho_{ц} + R_3$, найдены сторона C и угол $\gamma + \theta_2$, противолежащий стороне A. Вычисляют сторону B. Затем для

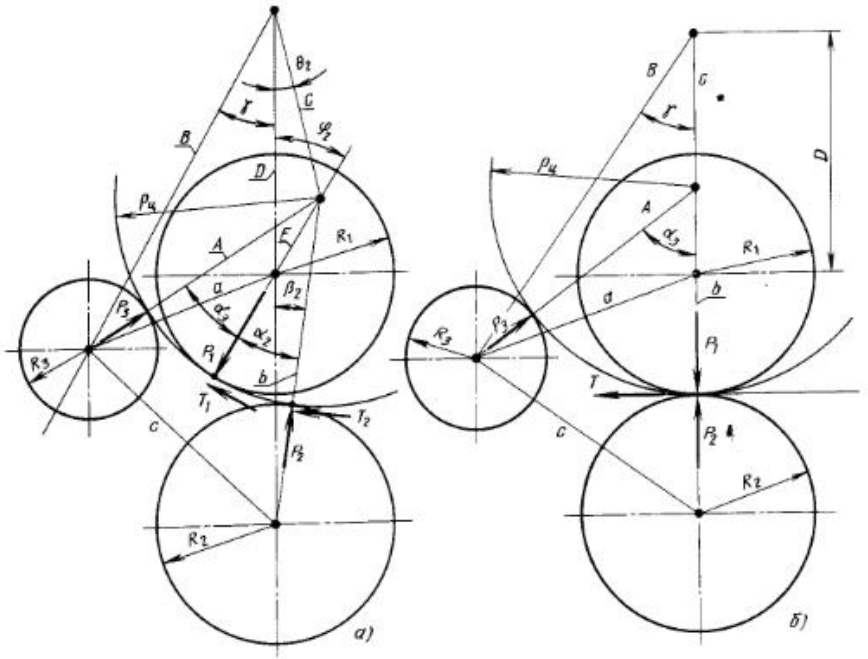


Рис. 44. Расчетные схемы соответствующие схемам нагружения на рис. 42

треугольника со сторонами a, A, E определяют сторону

$$a = [B^2 \sin^2\gamma + (B\cos\gamma - D)^2]^{1/2}$$

и косинус угла α_3.

Силы вычисляют по формулам

$$P_2 = M_z/\{\rho_ц [\sin\alpha_2 + \mu_c(\cos\alpha_2 - 1)]\}; \quad (114)$$

$$P_3 = M_z/(\rho_ц \sin\alpha_3); \quad (115)$$

$$P_1 = P_2(\cos\alpha_2 - \mu_c \sin\alpha_2) + P_3\cos\alpha_3. \quad (116)$$

Нажимное устройство должно развивать на втором валке вертикальное усилие

$$P_{н.в} = P_2\cos\beta_2 + T_2\sin\beta_2, \quad (117)$$

а его направляющие поверхности воспринимать горизонтальное усилие

$$P_{н.г} = P_2\sin\beta_2 + T_2\cos\beta_2. \quad (118)$$

В случае, когда $b = R_1 + R_2$, $\alpha_2 = 0$ (см. рис. 44,*б*), согласно (114), $P_2 = \infty$. Однако формула (114) применима до $\rho_ц [\sin\alpha_2 + \mu_c(\cos\alpha_2 - 1)] \geqslant 5$. При $\rho_ц [\sin\alpha_2 + \mu_c(\cos\alpha_2 - 1)] \to 0$ сила $P_2 \to P_{сд}$ (59). Следовательно,

$$P_{н.в} \geqslant P_{сд}, \quad P_{н.г} = T. \quad (119)$$

Силу P_3 рассчитывают по формуле (115), но поскольку имеет место изгиб сдвигом, значение внутреннего изгибающего момента M_z, найденное по формулам (14)—(16), следует уменьшить на 30—50 %.

5. ГИБКА ТРУБ И СТЕРЖНЕЙ СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Схемы гибки на гибочных машинах и устройствах. Схемы гибки труб круглого сечения наматыванием на копир показаны на рис. 45. Конец трубы *7*

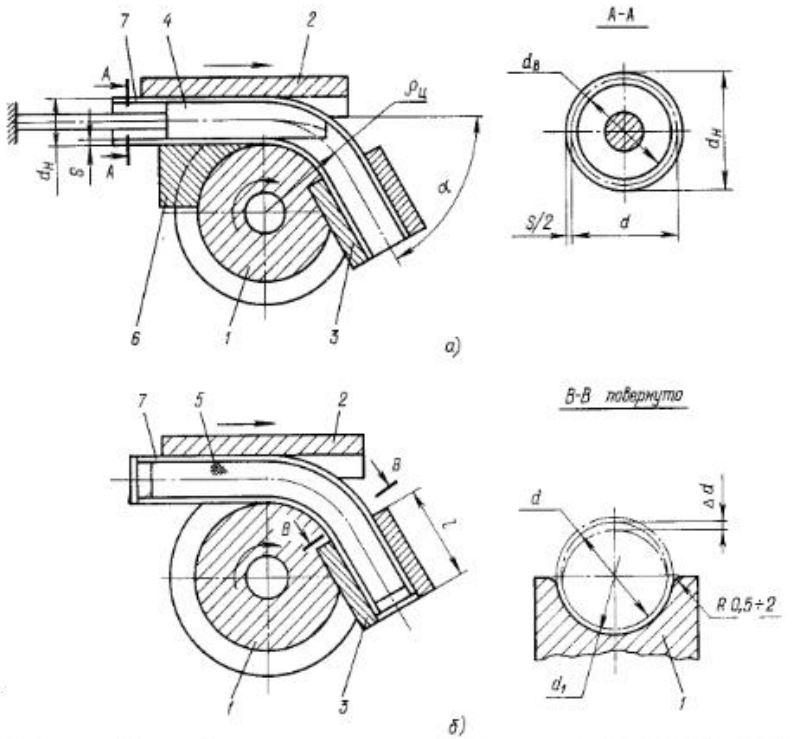


Рис. 45. Схемы гибки трубы круглого сечения наматыванием на вращающийся копир: *а* — с оправкой; *б* — с наполнителем; *1* — копир; *2* — нажимной ползун; *3* — прижим; *4* — оправка; *5* — наполнитель; *6* — складкодержатель; *7* — труба

закрепляют на копире *1* с помощью прижима *3*. С противоположной от копира стороны располагается нажимной ползун *2*. В трубу вводят или оправку *4*, или наполнитель *5*. Складкодержатель *6* охватывает трубу со стороны копира *1*. При вращении копира труба стягивается с неподвижной оправки *4* и наматывается на копир до заданного угла α. Ползун воспринимает усилие гибки и движется вместе с трубой, чтобы не возникла сила трения. Вращение копира может сопровождаться его качением по неподвижному нажимному ползуну. Роль ползуна может выполнять неподвижно закрепленный ролик или нажимная колодка.

Угол гибки, обеспечиваемый гибочными машинами, обычно $\alpha \leqslant 210°$; при $\alpha > 180°$ копир выполняют разъемным в плоскости $\rho\theta$.

Обычно обеспечивается гибка труб с отношением $s/d \geqslant 0{,}03$. Наименьший радиус изгиба $\rho_ц = 1{,}5d$.

Диаметр d_1 сечения тороидальной поверхности копира, а также цилиндрической поверхности ползуна берется равным $1{,}01d_н$. Радиус копира назначают с учетом пружинения.

Длину прижима принимают $l \geqslant 1{,}5d$. Если деталь должна иметь несколько изогнутых участков достаточной длины, сопряженных между собой без промежуточных прямых участков, прижим *3* для последующей гибки выполняют с тороидальной зажимной поверхностью, соответствующей участку предшествующей гибки. Складкодержатель *6* используют на

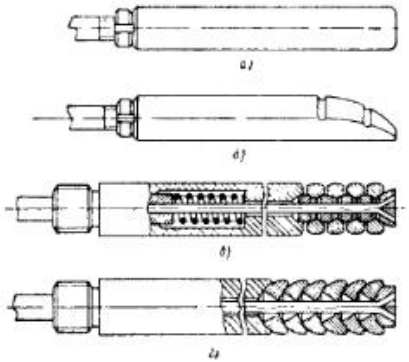


Рис. 46. Виды оправок, вводимых в трубы круглого сечения:
а — цилиндрическая; *б* — ложкообразная; *в* и *г* — гибкие составные с кольцами

гибочных машинах повышенной точности для изгиба особотонкостенных труб на радиус $\rho_п \leqslant 1{,}5d_н$.

Виды оправок показаны на рис. 46, области их применения на рис. 47. При гибке без оправки и без наполнителя сечение трубы искажается (см. рис. 45,*б*). Относительное изменение диаметра сечения для $0{,}03 \leqslant s/d \leqslant 0{,}2$

$$\Delta d/d = 6\,(0{,}2 - s/d)/(\rho_ц/d)^2.$$

При $s/d > 0{,}2$ и $\rho_ц/d > 2$ искажение незначительно; $\Delta d/d < 0{,}07$.

Поверхность ложкообразных оправок, контактирующую с изогнутым участком трубы, выполняют тороидальной. Взаимное расположение рабочих поверхностей копира и оправки обеспечивается при наладке. Если

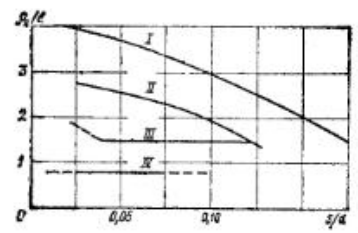


Рис. 47. Области применения оправки:
над линией *I* оправки не требуется; над линией *II* — цилиндрической; над линией *III* — ложкообразной; над линией *IV* — гибкой

между цилиндрическими поверхностями оправки и трубы имеется зазор, его можно в определенной степени компенсировать. Для этого оправку устанавливают так, чтобы ее тороидальная поверхность по возможности ближе вписывалась в заданную тороидальную поверхность изгибаемой части трубы.

Допускаемый зазор между цилиндрическими поверхностями ложкообразной оправки и трубы в зависимости от $d_в$ имеет следующие значения:

$d_в$, мм	до 5,0	50—100
Зазор, мм	0,5—1,0	1,0—1,5

$d_в$, мм	101—200	св. 200
Зазор, мм	1,5—2,0	2—3

При гибке труб обычной точности на каждый типоразмер трубы диаметром до 50 мм рекомендуется применять не менее двух оправок различного диаметра; при большем диаметре труб — не менее трех оправок, поскольку разброс значений $d_в$ превышает величину допускаемого зазора между оправкой и трубой. При гибке труб повышенной точности обычно применяют одну оправку на каждый размер трубы.

Длина цилиндрической части оправки составляет от $5d$ (при $d \leqslant 30$ мм) до $3d$ (при $d \geqslant 120$ мм).

Смазывание трущихся поверхностей оправки и трубы производится через каналы в оправке, либо внутреннюю поверхность трубы смазывают заранее. Перед смазыванием трубу необходимо очистить от окалины и загрязнений.

В мелкосерийном производстве для изготовления деталей из тонкостенных труб вместо оправки часто применяют наполнитель.

Наматывание заготовки может быть осуществлено как при вращающемся, так и при неподвижном копире (рис. 48). Гибку с неподвижным копиром применяют для особо длинных заготовок (до 100 м), при изготовлении деталей, имеющих несколько изогнутых участков, сопряженных друг с другом или разделенных относительно

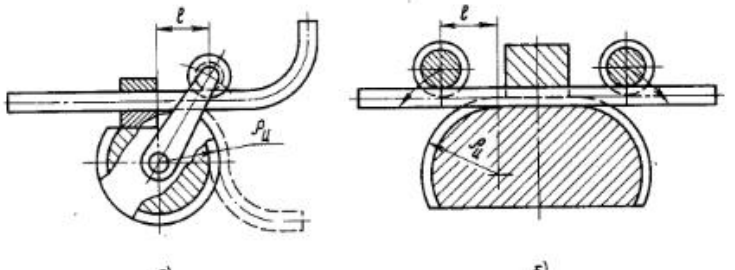


Рис. 48. Схемы гибки труб наматыванием на неподвижный копир:
а — односторонняя; *б* — двусторонняя

короткими прямыми участками, а также при групповой гибке труб, собранных предварительно в плоские ряды (плети). При наматывании трубы на неподвижный копир оправку в нее не вводят. Данную схему гибки применяют, как правило, при $s/d \geqslant 0{,}06$, $\rho_ц/d \geqslant 1{,}8$ и $d \leqslant 80$ мм. Плечо действия поперечной силы $l = (3 \div 5)\,d$.

Схему двусторонней гибки (рис. 48,*б*) применяют в специализированных гибочных машинах для крупносерийного и массового производства.

В машинах для гибки труб прямоугольного сечения и стержней со сложной формой поперечного сечения используют схему гибки наматыванием на копир (рис. 49). В плоскости гибки копир может иметь некруглую форму. При этом в процессе вращения копира нажимная колодка совершает возвратно-поступательное движение.

Схема гибки в роликах труб и стержней со сложной формой поперечного сечения не отличается принципиально от схемы гибки в валках листового металла (см. рис. 42, 43). Но форма сечений роликов плоскостью z, ρ профилируется, т. е. соответствует форме поперечного сечения изгибаемого стержня. Это необходимо для обеспечения по возможности наибольшей площади контакта роликов с заготовкой, что уменьшит напряжения смятия, приводящие к искажению формы поперечного сечения детали. Кроме того, если сечение заготовки плоскостью z, ρ не симметрично относительно луча ρ, профилированные поверхности роликов воспринимают на себя осевые силы.

Машины для гибки в роликах несимметричных заготовок могут иметь дополнительные ролики, воспринимающие осевые силы. Оси вращения дополнительных роликов обычно перпендикулярны осям основных роликов.

Гибку симметричных заготовок с относительно малой высотой поперечного сечения можно производить по двухроликовой схеме; один ролик покрывают толстым слоем эластичного материала.

Схема гибки труб в роликах с устройством для создания проталкивающей силы $P_п$ (рис. 50) удобна для реализации в машинах с программным управлением. В зоне деформации может быть установлено нагревательное устройство для нагрева узкой зоны заготовки. Если в области формоизменения необходимо создать продольное сжатие усилием $P_θ$ для расширения технологических возможностей процесса, гибочный ролик *2* (см. рис. 50) заменяют водилом *2* (рис. 51).

Продольное сжатие в сочетании с локализацией формоизменения в узкой зоне нагрева позволяет уменьшить утонение трубы на выпуклой стороне и отклонение от круглости его поперечного сечения. Так, при $\rho_ц/d = 1{,}4 \div 1{,}5$ и $s/d \geqslant 0{,}025$ утонение не превышает 6 %, отклонение от круглости 10—15 %. Минимальное значение $\rho_ц/d = 0{,}8 \div 1{,}0$.

Схема гибки путем проталкивания заготовки через фильеры (рис. 52) сходна со схемой проталкивания через ролики (см. рис. 50). Отличие — возможность поворота фильер *1—3* вокруг центральной линии заготовки, а сле-

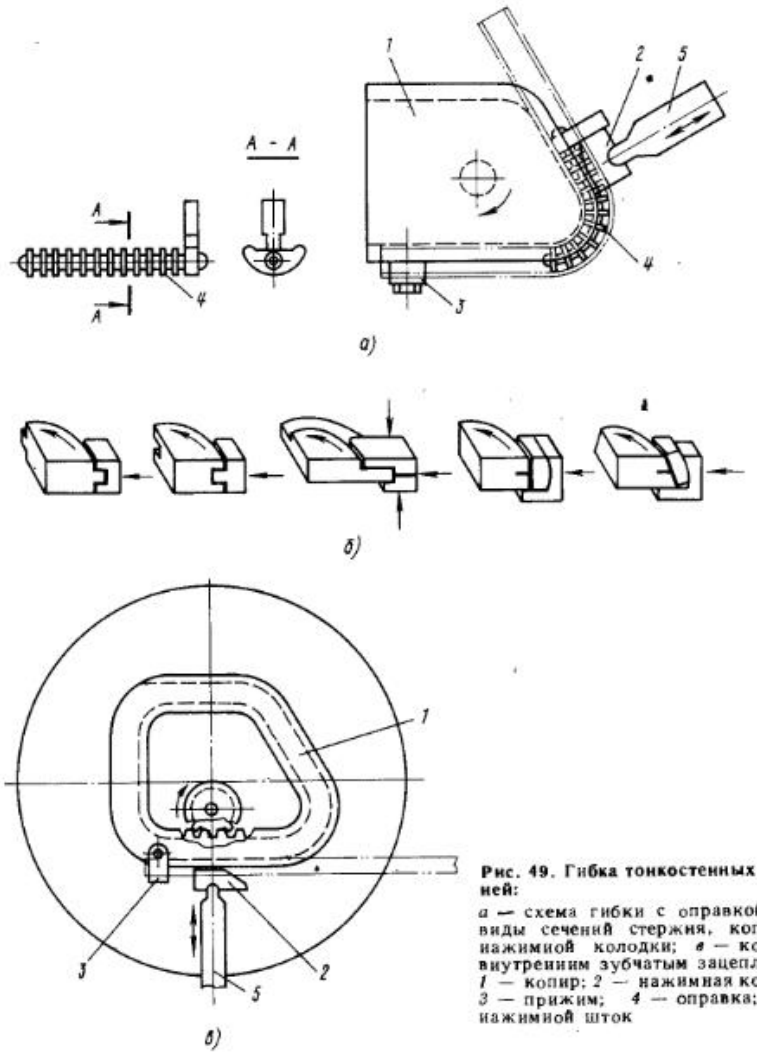


Рис. 49. Гибка тонкостенных стержней:
а — схема гибки с оправкой; *б* — виды сечений стержня, копира и нажимной колодки; *в* — копир с внутренним зубчатым зацеплением; *1* — копир; *2* — нажимная колодка; *3* — прижим; *4* — оправка; *5* — нажимной шток

довательно, и поворота сечения последней относительно плоскости гибки. С помощью одного комплекта фильер можно получать различные детали, отличающиеся не только по кривизне, но и по углу ориентации сечений заготовки относительно плоскости гибки (например, кольца из углового проката полкой наружу и полкой внутрь).

Плоскость гибки часто не совпадает с плоскостью симметрии поперечного сечения заготовки; в этом случае возможность поворота фильер позволяет подобрать такие значения их угловой ориентации, при которых изгиб в незаданной плоскости исключается.

Схему гибки труб эксцентричным ротационным выдавливанием (рис. 53) применяют для изготовления особо тонкостенных деталей. При одном и том же отношении $\rho_{\text{п}}/d$ утонение трубы получается в 1,5—2 раза больше, чем

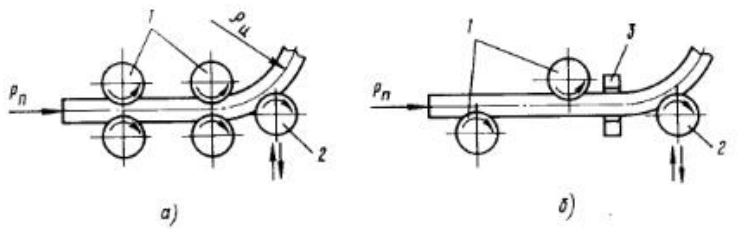


Рис. 50. Схема гибки труб проталкиванием через ролики:
а — без нагрева; *б* — с нагревом в узкой зоне; *1* — ролики; *2* — гибочный ролик; *3* — нагревательный индуктор; $P_{\text{п}}$ — проталкивающая сила

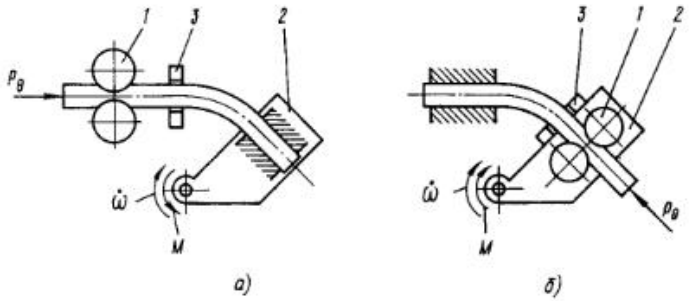


Рис. 51. Схема гибки труб с продольным сжатием:
а — с подвижным прижимом; *б* — с неподвижным прижимом; *1* — ролики; *2* — водило; *3* — нагревательный индуктор: P_θ — сжимающая сила; M — крутящий момент; $\dot{\omega}$ — угловая скорость

при гибке наматыванием, но отклонение от круглости поперечных сечений значительно меньше; образование гофров полностью исключается.

Схема устройства для гибки относительно короткой трубы показана на рис. 54. Заготовка проталкивается через торондальный канал разъемной матрицы, принимая форму сектора тора. В исходном состоянии торцы заготовки должны быть скошены под углом φ [см. формулу (80)]. Для предотвращения гофрообразования создается давление q эластичного наполнителя, к которому приложено усилие противодавления $N_{\text{п}}$. Данная схема позволяет уменьшить утоненне трубы.

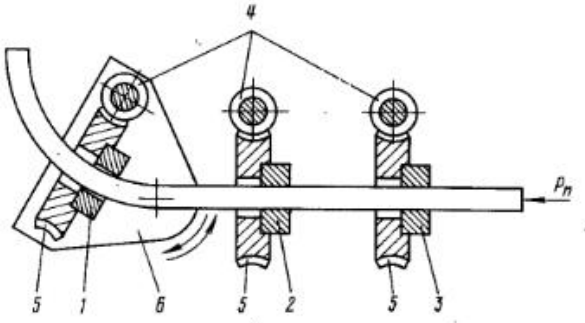


Рис. 52. Схема гибки труб и тонкостенных стержней проталкиванием через фильеры:
1, 2, 3 — фильеры; *4, 5* — червячное зацепление; *6* — поворотная головка; $P_{\text{п}}$ — проталкивающая сила

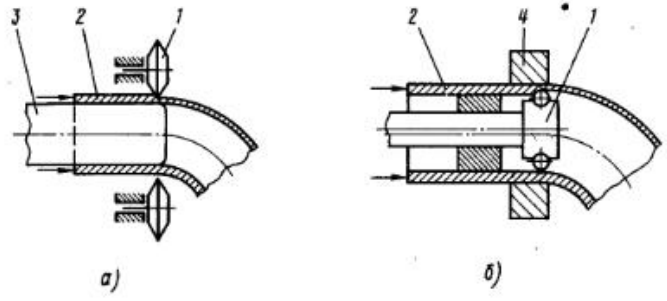


Рис. 53. Схема гибки труб эксцентричным ротационным выдавливанием (раскаткой):
а — наружным; *б* — внутренним; *1* — раскатный инструмент; *2* — изгибаемая труба; *3* — оправка; *4* — кольцо

Гибку с раздачей протягиванием через трубу рогообразной оправки (рис. 55) обычно выполняют с нагревом заготовки. Параметры процесса следующие: $s/d \geqslant 0{,}05$; наименьшее отношение $\rho_ц/d = 1$; $\alpha \leqslant 180°$. Неравномерность толщины стенки вдоль контура поперечного сечения значительно меньше, чем при гибке наматыванием. Этим способом можно изготовить деталь типа змеевика, если ось рабочей части оправки выполнить винтовой.

Гибку труб и тонкостенных стержней на относительно небольшую кривизну, мало отличающуюся от упругого изменения кривизны при разгрузке, обычно выполняют на машинах и устройствах с приложением продольного растяжения. Гибку с растяжением широко применяют в транспортном машиностроении для получения деталей типа шпангоута.

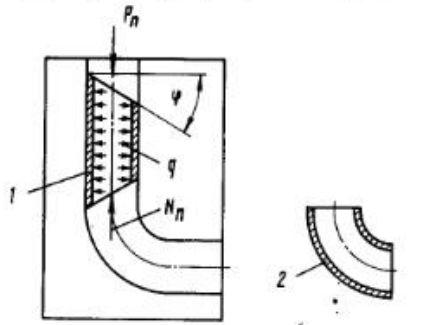


Рис. 54. Схема гибки короткой трубы проталкиванием через тороидальный канал разъемной матрицы:
$N_п$ — сила противодавления; q — давление наполнителя; φ — угол скошенного торца заготовки; *1* — заготовка; *2* — деталь

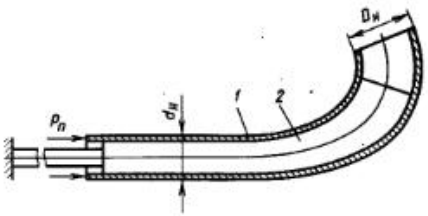


Рис. 55. Схема гибки протягиванием через трубу рогообразной оправки:
1 — заготовка; *2* — оправка; $d_н$ — диаметр заготовки; $D_н$ — диаметр детали

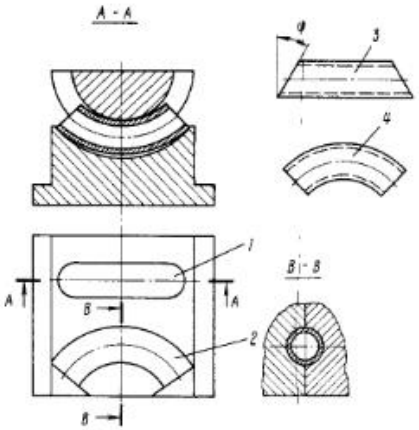


Рис. 56. Схема штампа для гибки короткой трубы:
1 — гибочный ручей; *2* — калибровочный ручей; *3* — заготовка; *4* — деталь

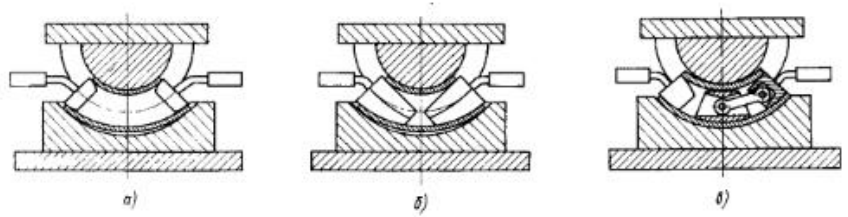


Рис. 57. Схема штампа для гибки короткой трубы с введением оправок:
а — с короткими цилиндрическими оправками; *б* — с ложкообразными (тороидальными) оправками; *в* — с шарнирной (справа) и простой (слева) оправками

Схемы гибки труб в штампах. Эти схемы показаны на рис. 56—58. Заготовка, изогнутая в первом ручье штампа (рис. 56), имеет отклонение от некруглости, устраняемое во втором ручье.

Рекомендуемые параметры процесса: $s/d \geqslant 0{,}17$; $\rho_ц/d = 1{,}3 \div 1{,}5$. Уменьшение диаметра сечения при обжатии во втором ручье при горячей гибке составляет 6—8 %, при холодной 8—10 %.

Торцовые оправки (рис. 57) применяют при $s/d = 0{,}09 \div 0{,}17$; $\rho_ц/d = 1{,}3 \div 1{,}5$; шарнирные — при $s/d = 0{,}06 \div 0{,}09$; $\rho_ц/d = 1{,}3 \div 1{,}5$; ложкообразные — при $d \leqslant 100$ мм; $s/d = 0{,}08 \div 0{,}09$; $\rho_ц/d = 1{,}3 \div 1{,}5$ или при $s/d = 0{,}06 \div 0{,}08$; $\rho_ц/d = 1{,}7 \div 1{,}8$.

Схему, показанную на рис. 58, применяют для горячей штамповки деталей с параметрами: $d_н = 100 \div 850$ мм; $s/d \geqslant 0{,}05$; $\rho_ц/d \geqslant 0{,}8$; $\alpha \leqslant 120°$; $m = (0{,}3 \div 0{,}4)\,d$. Обжатие трубы по диаметру составляет 5—8 %, отклонение от круглости поперечного сечения не более 3 %, утонение стенки трубы — до 6 %.

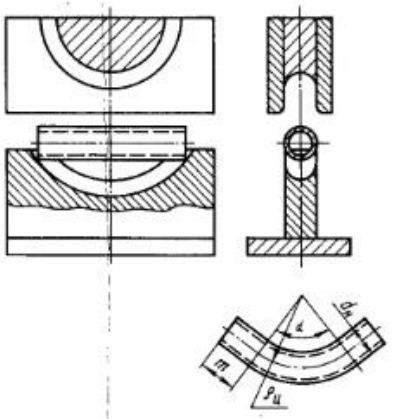


Рис. 58. Схема штампа для гибки трубы

6. ТОЧНОСТЬ ГИБКИ

Точность сектора цилиндрической оболочки или кольца. *Кривизна центральной линии* сектора после разгрузки $\chi_{ц\cdot о} = \chi_\rho - \Delta\chi_\rho$. Поле отклонения кривизны от номинального значения

$$\delta\chi_{ц\cdot о} = \delta\chi_\rho - \delta(\Delta\chi_\rho). \qquad (120)$$

Поле $\delta\chi_\rho$ отклонения кривизны χ_ρ поверхности инструмента от номинального значения задается при выборе уровня точности инструмента. Поле $\delta(\Delta\chi_\rho)$ отклонения приращения кривизны $\Delta\chi_\rho$ при разгрузке от его расчетного значения (61)

$$\delta(\Delta\chi_\rho) = \Delta\chi_{\rho б} - \Delta\chi_{\rho м}, \qquad (121)$$

где

$$\Delta\chi_{\rho б} = (1-\mu^2)\,M_{zб}/EJ_{zм};$$
$$\Delta\chi_{\rho м} = (1-\mu^2)\,M_{zм}/EJ_{zб}. \qquad (122)$$

Здесь $M_{zб}$ — изгибающий момент при наибольших значениях констант кривой упрочнения (A или $\sigma_{т0}$ и n) и наименьших размерах сечения заготовки, дающих наименьший момент инерции $J_{zм}$; $M_{zм}$ — изгибающий момент при наименьших значениях констант кривой упрочнения и наибольших размерах сечения, дающих наибольший момент инерции $J_{zб}$. Влияние на $\delta(\Delta\chi_\rho)$ разброса значений μ и E в формуле (122) не учитывается.

Для сектора кольца, полученного при изгибе стержня, в равенствах

8. Отклонения длины полки (размеры, мм)

Толщина	Длина полки		
	50	50—100	100—200
0,5	0,10	0,16	0,20
1,0	0,16	0,20	0,24
3,0	0,20	0,24	0,30

(122) принимают $\mu = 0$. Для сектора цилиндрической оболочки

$$\Delta\chi_{\rho б} = 12A_б(1-\mu^2)\,m_z/Es_м,$$

$$\Delta\chi_{\rho м} = 12A_м(1-\mu^2)\,m_z/Es_б, \quad (123)$$

где $A_б$ и $A_м$ — наибольшее и наименьшее значения константы A (18); $s_б$ и $s_м$ — наибольшее и наименьшее значения толщины заготовки; m_z — см. табл. 1.

Угол сектора. Угол дуги центральной линии радиуса $\rho_{ц.о}$ сектора после разгрузки

$$\alpha_0 = \alpha - \Delta\alpha; \quad (124)$$

поле его отклонения

$$\delta\alpha_0 = \delta\alpha - \delta(\Delta\alpha), \quad (125)$$

где поле отклонения $\delta\alpha$ задают в инструменте при выборе уровня точности его изготовления;

$$\delta(\Delta\alpha) = \Delta\alpha_б - \Delta\alpha_м = \alpha\delta(\Delta\chi_\rho)/\chi_\rho \quad (126)$$

($\Delta\alpha_б$ и $\Delta\alpha_м$ — наибольшее и наименьшее по модулю приращения угла α при разгрузке).

Цилиндричность сектора оболочки. Вблизи оснований оболочки образуются краевые зоны двойной кривизны (см. рис. 36), если при нагружении заготовки внешняя осевая нагрузка, необходимая для цилиндрической гибки, отсутствует. При гибке в штампе краевая зона двойной кривизны может быть выправлена во время сближения цилиндрических поверхностей пуансона и матрицы, если это предусмотрено в конструкции штампа и в расчете усилия гибки. При гибке в валках зону двойной кривизны выправляют валками, расположенными с выпуклой стороны оболочки.

Плоскостность сектора кольца. Плоскостность сектора кольца обеспечивается при изгибе стержня с симметричным сечением. Если форма сечения стержня несимметрична при плоской форме изгиба стержня, отклонение от плоскостности возникает при разгрузке заготовки. Приращение $\overline{\Delta\chi}$ кривизны при разгрузке имеет компоненту $\Delta\chi_z$ (60), приводящую к нарушению плоскостности.

Сохранение формы области заготовки, примыкающей к изогнутому сектору и не подлежащей формоизменению гибкой. Форма области стержневой заготовки, примыкающей к сектору кольца, сохраняется обычно в схемах гибки, предусматривающих прижимные устройства и малое плечо действия изгибающей силы (см., например, рис. 19, 24, 29, 45, 49), а также в схемах гибки путем эксцентричного ротационного выдавливания (см. рис. 53). В противном случае изгиб захватывает некоторую часть области, не подлежащей формоизменению.

Положение области, не подлежащей формоизменению гибкой, относительно изогнутого сектора обычно задают длиной ее центральной линии, отмеряемой от плоскости, ограничивающей изогнутый сектор со стороны этой области. Для фиксации положения этой области относительно рабочих поверхностей гибочного инструмента служат фиксирующее и прижимное устройства. Отклонение длины области от ее номинального значения зависит не только от точности фиксации положения области, но и от точности движений инструмента, обеспечивающих заданный угол сектора. Это имеет место, например, при гибке по схемам, представленным на рис. 14, 19, 24, 29.

В табл. 8 приведены практические данные об отклонениях длины полки $ПК$ (см. рис. 29) при гибке на штампах с фиксирующим, прижимным и с поворотным гибочным устройствами, работающих по схеме наматывания.

7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Пример 1. Требуется определить технологические параметры гибки в штампе при изготовлении скобы (рис. 59) в крупносерийном производстве и выбрать схему гибки.

Согласно техническим требованиям к детали на внешней поверхности полок не должно быть следов вдавливания. Остаточная кривизна после гибки на участке длиной 28 мм от конца полки и на средней части детали с размером 40 мм не допускается. Уменьшение толщины материала и искажение формы поперечного сечения на изогнутых участках не ограничены. Характеристики материала заготовки: $\sigma_{02} = (250 \pm 25)$ МПа; $\sigma_в = (400 \pm 40)$ МПа; $n = 0{,}2$; $\varepsilon_{р.р} = 0{,}65$; $s(0) = 5_{-0{,}5}$ мм; $B(0) = 30_{-0{,}3}$ мм.

По условиям нагружения в слое радиусом ρ_k деформация разрушения металла $\varepsilon_р = \varepsilon_р^c = \varepsilon_р^k \approx 0{,}5$ [см. (8), гл. 1]. Относительная кривизна при разрушении согласно (67) $(s/\rho_0)_{пр}^k \simeq 2{,}4$. По чертежу детали $s/\rho_0 = 1$.

Согласно табл. 4 для $s(0)/\rho_0 = 1$; $n = 0{,}2$ имеем $a \cdot s(0) = 0{,}45$. Следовательно, при $s(0) = 5$ мм $a = 2{,}25$; $\rho(\varepsilon_\theta = 0) = 7{,}25$ мм. Исходная длина изогнутого участка по (71) $L(0) = 8{,}85$ мм. Длина заготовки равна $38 \cdot 2 + 8{,}85 \times 2 + 40 = 133{,}7$ мм.

Согласно табл. 1 для $k = 0$; $n = 0{,}2$; $s(0)/\rho_0 = 1$; $a/s(0) = 0{,}45$ безразмерный изгибающий момент $m_z = 0{,}21$ (в интервале от $a/s(0) = 0{,}40$ до $a/s(0) = 0{,}50$ принята линейная зависимость m_z по $a/s(0)$).

При номинальных значениях $\sigma_в$, $s(0)$, $B(0)$ изгибающий момент $M_z = 106$ кН·мм. Изгибающий момент в сечении (в точке $Г$ — см. рис. 19), ограничивающем упругую зону, при номинальном значении σ_{02} составляет $M_{zy} = 31$ кН·мм. Чтобы зона $ГМ$ находилась в упругом состоянии, плечо поперечной силы должно удовлетворять условию $ПМ \leqslant ПГ/(1 - M_{zy}/M_z) = 14$ мм, тогда поперечная сила $P_м = M_z/ПМ = 7{,}57$ кН. Согласно равенствам (101)—(103) пластического вдавливания опорных поверхностей матрицы в заготовку не будет, если $r_м \geqslant 34$ мм (принято $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\sigma_{Нд} = 2\sigma_{02} = 500$ МПа). Опорная поверхность такого радиуса не вписывается в конструкцию штампа, работающего по

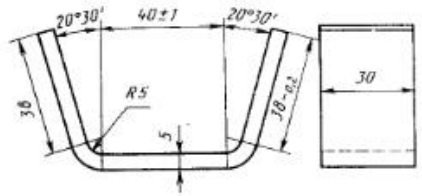


Рис. 59. Эскиз детали

схемам, показанным на рис. 19 и 24, поэтому целесообразно принять схему гибки наматыванием (см. рис. 29). При этом сдвигающая сила согласно формуле (59) $P_{сд} = 41$ кН; сила на гибочном устройстве матрицы $P_м \geqslant P_{сд}$; сила на прижимном устройстве $P_{пр} = 2P_{сд}$. Если нажимная колодка совершает движение без скольжения по заготовке, сила на пуансоне (97) в начале рабочего хода $P_{пс} = 4P_{сд}$; в конце рабочего хода $P_{пс} = 2{,}7P_{сд}$.

Согласно (122) наибольшее и наименьшее изменения кривизны при разгрузке составляют $\Delta\chi_{\rho б} = 0{,}0019$ мм$^{-1}$ и $\Delta\chi_{\rho м} = 0{,}0014$ мм$^{-1}$. Отклонение угла пружинения от номинального расчетного по (126) $\delta(\Delta\alpha) \simeq 14'$.

Формулы (122), (126) получены для случая изгиба под воздействием только моментов M_z. При изгибе под воздействием сдвигающей силы внутренний изгибающий момент существенно уменьшается, т. е. фактическое пружинение и поле его отклонения от номинального будут меньше полученных выше.

Пример 2. Требуется определить технологические параметры гибки в штампе при изготовлении сектора цилиндрической оболочки (рис. 60) в крупносерийном производстве. Искажение формы прямоугольного поперечного (меридианного) сечения сектора ограничено технологическими требованиями на изделие. Угол поворота малой стороны (размер 10 мм) не более $\pm 1°$; стрела прогиба большой стороны (размер 50 мм) не более 0,15 мм. На выпуклой цилиндрической поверхности изделия допускаются следы пластического вдавливания матрицы. Характеристики материала заготовки: $\sigma_{02} = (300 \pm 30)$ МПа; $\sigma_в = (450 \pm 45)$ МПа; $n = 0{,}3$; $A = (872 \pm 87)$ МПа; $\varepsilon_{р.р} = 0{,}60$; $s(0) =$

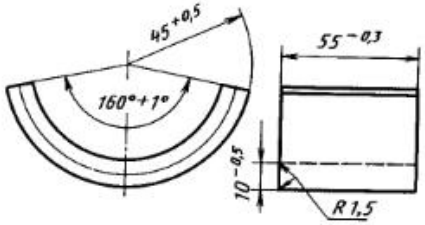


Рис. 60. Эскиз детали

$= 10_{-0,5}$ мм. Исходный материал поступает на штамповку в виде полосы с требуемой формой поперечного сечения.

Согласно табл. 3 и 4 для $s(0)/\rho_0 = 0,286$, $n = 0,3$ имеем $a/s(0) \approx 0,47$ и $s/s(0) = 0,98$. Уменьшение толщины заготовки в процессе гибки значительно меньше поля допуска на толщину, и его можно не учитывать при назначении размера $s(0)$. Для того чтобы номинальная форма поперечного сечения изделия была прямоугольной, форма сечения заготовки должна быть приблизительно трапециевидной. Размеры $B_0^*(0)$ и $B_k^*(0)$ можно подсчитать приближенно по формулам (43), (44), полагая, что искажение захватывает краевую зону сечения $s(0) \times s(0)$, принимая $B^* = 2s(0)$; $s^* = s(0)$. Подстановка в равенства заданных номинальных размеров дает: $B_0^*(0) = 18,7$ мм; $B_k^*(0) = 21,2$ мм. Следовательно, малое и большое основания трапеции принимают равными 53,7 и 56,2 мм.

При $a/s(0) = 0,47$ и $s(0) = 10$ мм имеем $\rho(\varepsilon_0 = 0) = 39,7$ мм. Длина дуги этого радиуса в растворе угла $\alpha_к = 80°$ составляет $L(0) = 55,4$ мм. Торцы заготовки согласно (80) должны быть выполнены под углом $\varphi \approx 11°$. Наклон торцов заготовки приводит к увеличению ее длины примерно на 2 мм. Таким образом, принимают длину заготовки 113 мм.

Для того чтобы при укладке заготовки в штамп ее концы находились на плоскости зеркала матрицы, должно выполняться неравенство (82). При $R_п = 40$ мм; $s(0) = 10$ мм; $\alpha_к = 80°$ согласно (82), $R_м/s \leqslant 1,67$; $R_м \leqslant 16,7$ мм; $r_м \leqslant R_м - s/2 \leqslant 11,7$ мм. Радиус $r_м$ может быть принят равным 8 мм, тогда $R_м = 13$ мм, причем отрезок $M(0)K(0) = 3,7$ мм. Ширина плоской опорной площадки с учетом того, что торцы заготовки выполнены под углом φ, равна 4,7 мм. При выводе неравенства (82) принято, что рабочая поверхность матрицы радиуса, равного сумме $R_п + s/2$, ограничена меридианными плоскостями, проведенными под углом $\alpha_к = 80°$ к плоскости симметрии. Для компенсации отклонений размеров при изготовлении матрицы и заготовок этот угловой размер рабочей поверхности матрицы следует увеличить на 10° и принять $\alpha_к = 90°$. Длина отрезка $M(0)K(0)$ при этом сократится примерно на 0,2 мм. Таким образом, рабочую поверхность матрицы принимают в виде полуцилиндра радиусом $r_п + s = 45$ мм; радиус опорных поверхностей $r_м = 8$ мм. При этом расстояние $A = R_м + R_п = 53$ мм.

Безразмерный изгибающий момент, согласно табл. 1, $m_z = 0,138$ (в интервалах изменения $a/s(0) = 0,4 \div 0,5$; $s(0)/\rho_0 = 0,20 \div 0,33$ принята линейная зависимость m_z по $a/s(0)$ и $s(0)/\rho_0$). При номинальных значениях $\sigma_в$, $s(0)$, $B(0)$ имеем $M_z = 662$ кН·мм. В начальный период гибки силу $P_м$ можно найти по формуле (85). При $\alpha = 30°$ имеем $l/s = 3,2$; $P_м = 20,7$ кН. Силу $P_{пр}$ на прижимном устройстве можно принять равной $P_м$.

При гибке образуется искаженная краевая зона. Ее параметры: $\rho_\gamma \approx 2\rho(s/2) = 80$ мм; $\gamma \approx 1,5s/\rho_\gamma = 0,19$ рад; $\eta = 1,4$ мм. Техническими требованиями допускается стрела прогиба сечения не более 0,15 мм. Следовательно, при завершении процесса гибки необходимо предусмотреть устранение кривизны $1/\rho_\gamma$ сечения путем сжатия заготовки между цилиндрическими поверхностями матрицы и пуансона. Необходимая при этом сила согласно формуле (95) $P_\rho = 370$ кН. По значению P_ρ выбирают пресс.

Наибольшее и наименьшее изменения (приращения) кривизны при разгрузке по формуле (122): $\Delta\chi_{\rho б} = 0,00076$ мм$^{-1}$; $\Delta\chi_{\rho м} = 0,00059$ мм$^{-1}$. Номинальная кривизна (остаточная) центральной (срединной) поверхности $1/\rho_{ц\cdot о} = 1/40 = 0,025$ мм$^{-1}$. Кривизну, на которую должна быть изогнута

заготовка, принимают как сумму остаточной номинальной кривизны и наибольшего приращения кривизны при разгрузке, т. е. $1/\rho_ц = 1/\rho_{ц\cdot о} + \Delta\chi_{\rho б} = 0,02576$ мм$^{-1}$ $= 1/38,8$ мм$^{-1}$. Тогда кривизна детали (остаточная) будет изменяться в пределах от $1/\rho_{ц\cdot о} = 1/\rho_ц - \Delta\chi_{\rho б} = 1/40$ мм$^{-1}$ до $1/\rho_{ц\cdot о} = 1/\rho_ц - \Delta\chi_{\rho м} = 0,02517 = 1/39,7$ мм$^{-1}$, что не выходит за пределы поля допуска. Поле отклонения угла пружинения по формуле (122) $\delta(\Delta\alpha) = \alpha\delta(\Delta\chi_\rho)/\chi_\rho = \alpha(\Delta\chi_{\rho б} - \Delta\chi_{\rho м})\rho_ц = 0,020$ рад $= 1,16°$ также не выходит за пределы поля допуска. Можно ожидать, что действительное пружинение будет меньше, так как для устранения кривизны $1/\rho_\gamma$ изогнутую заготовку подвергают сильному сжатию. Размер $s(0)$ заготовки при заданном допуске может изменяться от $s(0) = 10$ мм до $s(0) = 9,5$ мм. Если $s(0) = 9,5$ мм, а $(r_п + s)^{ш} - r_п^{ш} = 10$ мм, то при полном смыкании штампа расстояние между цилиндрическими поверхностями пуансона и матрицы соответственно будет изменяться по углу θ от 9,5 мм в плоскости симметрии ($\theta = 0$) до 10 мм при $\theta = 90°$. Устранение кривизны $1/\rho_\gamma$ произойдет лишь в зоне, расположенной около плоскости симметрии. Для того чтобы допускаемая стрела прогиба поперечного сечения деталн не превышала 0,15 мм, заготовки должны быть рассортированы на партии, в которых поле допуска на толщину не превышает 0,10 мм; штамп должен быть оснащен сменными пуансонами.

Таким образом, исполнительный номинальный радиус цилиндрической поверхности матрицы равен 43,8 мм. Исполнительные номинальные радиусы сменных пуансонов, мм: 33,8; 33,9; 34,0; 34,1; 34,2; 34,3.

Глава 4 ВЫТЯЖКА ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ

1. ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЗАГОТОВКИ

При движении пуансона *1* (рис. 1) заготовка *4* втягивается в матрицу *2* и из плоского диска радиуса R (0) формоизменяется в осесимметричную оболочку. Ее срединная поверхность состоит из характерных по своему формоизменению частей, границами между которыми служат окружности, проходящие через точки O (*i*), $П$ (*i*), M (*i*), K (*i*) ($i = 0, 1, 2, 3$ — положения пуансона).

Часть поверхности с образующей $Ц$ (*i*) O (*i*) плоская. Здесь толщина s стенки остается постоянной вдоль $Ц$ (*i*) O (*i*) и сокращается по времени примерно до тех пор, пока центры кругов радиуса $r_п$ и $r_м$ не окажутся на одном уровне (положение пуансона $i = 2$). При сокращении толщины s металл вытекает через граничную нормальную поверхность, проходящую через точку O (*i*). Часть с образующей O (*i*) $П$ (*i*) — тороидная; здесь оболочка контактирует с пуансоном. Точка n (*i*) лежит на границе поверхности контакта; на срединной поверхности этой точке соответствует точка $П$ (*i*).

В процессе формоизменения геометрическая нормальная граничная поверхность движется вместе с точкой n (*i*). Мгновенные материальные точки, оказавшиеся на этой граничной поверхности, движутся в том же направлении, но с бо́льшей скоростью. Длина образующей увеличивается от нуля ($i = 0$) до значения, близкого к $\pi R_п/2$ ($i = 3$). Стенка имеет переменную по O (*i*) $П$ (*i*) толщину и утоняется по времени.

Точка S_m (*i*), в которой толщина s имеет минимальное значение, меняет свое положение во времени. Ее положение относительно точек O (*i*) и $П$ (*i*) зависит от силы трения, возникающей при скольжении поверхности оболочки относительно поверхности пуансона. Чем больше коэффициент трения, тем ближе точка S_m (*i*) к точке $П$ (*i*). Если сила трения так велика, что скольжение невозможно, то точка S_m (*i*) совпадает с точкой $П$ (*i*). Часть оболочки с образующей $П$ (*i*) M (*i*) не контактирует с инструментом [точка m (*i*) лежит на границе поверхности контакта оболочки с матрицей]. На рис. 1 она изображена прямой, но в действительности образующая искривлена, ее кривизна непостоянна как по $П$ (*i*) M (*i*), так и по времени. Длина $П$ (*i*) M (*i*) сокращается по времени от $П$ (0) M (0) $= r_п + r_м + z$ до минимальной, равной $П$ (2) M (2) в положении $i = 2$ пуансона. Затем она увеличивается, и в конце формоизменения (положение $i = 3$), когда точка K (3) окажется на линии $O_м O'_м$ (точка $O'_м$ симметрична точке $O_м$), ее длина равна $П$ (3) K (3). Когда длина $П$ (*i*) M (*i*) сокращается, геометрическая граничная поверхность вместе с точкой M (*i*) движется к оси симметрии заготовки с большей скоростью, чем скорость мгновенных материальных точек, оказавшихся на граничной поверхности. Через эту поверхность металл вытекает. Через движущуюся граничную поверхность с точкой $П$ (*i*) металл втекает. После положения пуансона $i = 2$ длина образующей $П$ (*i*) M (*i*) увеличивается, скорость материальных точек становится больше, чем скорость геометрической границы, через которую металл вытекает.

Часть оболочки на отрезке M (*i*) O' тороидальная; здесь оболочка контактирует с поверхностью матрицы. Радиус кривизны этой поверхности $R_м = r_п + s/2$ непостоянен, так как толщина оболочки s непостоянна вдоль M (*i*) O'. В процессе формоизменения длина M (*i*) O' увеличивается от нуля до значения, близкого к $\pi R_м/2$, когда плоскость центров $O_п$ (*i*) радиусов

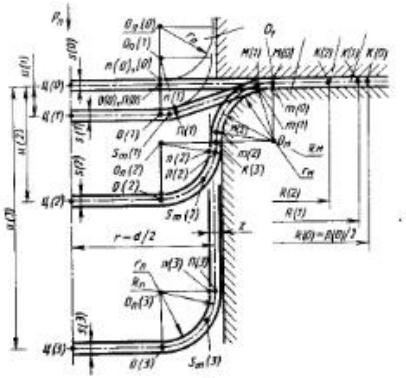


Рис. 1. Кинематика формоизменения заготовки при вытяжке

кривизны тороидальной поверхности пуансона опускается ниже плоскости центров $O'_м$. Но после мгновения, когда точка K (*i*) совпадает с точкой O', граничная поверхность, проходящая через точку O', заменяется поверхностью, проходящей через точку K (*i*). Образующая M (*i*) O' превращается в образующую M (*i*) K (*i*), длина которой к концу формоизменения уменьшается до нуля.

Часть поверхности с образующей $O'K$ (*i*) плоская. При формоизменении длина образующей уменьшается от значения, равного примерно R (0) $- r - R_м$, до нуля. Толщина s здесь непостоянна по $O'K$ (*i*) и по времени. В обычных условиях вытяжки, когда прижимное устройство *3* служит только для предотвращения выпучивания этой части оболочки, а отношение R (0)/r достаточно велико (близко к предельному), в зоне у границы в точке O' $s < s$ (0), а в другой зоне — у внешней границы в точке K (*i*) $s > s$ (0). Зона, где $s < s$ (0), и сечение, где $s = s$ (0), имеют место здесь только в начальный период формоизменения. Позднее они переходят в часть оболочки с образующей M (*i*) O'.

2. СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЯ

Из материальной точки A (рис. 2), находящейся на срединной поверхности какой-либо части оболочки, проведены малые ортогональные волокна $\Delta\rho$ или Δl_α в направлении образующей: Δl_θ — в окружном направлении и Δl_n — в направлении нормали.

Для точки A на образующей $Ц$ (*i*) O (*i*) (рис. 2, *а*) волокна $\Delta\rho$ и Δl_θ удлиняются со скоростями деформации $\dot{e}_\rho$ и $\dot{e}_\theta$ ($\dot{e}_\rho = \dot{e}_\theta$). Волокно Δl_n укорачивается со скоростью деформации $\dot{e}_n = -2\dot{e}_\rho = -2\dot{e}_\theta$.

Для точки A на образующей O (*i*) $П$ (*i*) (рис. 2, *б*) волокна Δl_α и Δl_θ удлиняются. Скорости их деформации $\dot{e}_\alpha$ и $\dot{e}_\theta$ положительные. Волокно Δl_n укорачивается ($\dot{e}_n < 0$). Под действием силы трения при скольжении оболочки по пуансону нормальное волокно несколько поворачивается от геометрической нормали, возникает угловая скорость деформации $\dot{e}_{\alpha n}$. Но, как правило, $\dot{e}_{\alpha n}$ относительно мала, и ею пренебрегают.

Для точки A на образующей $П$ (*i*) M (*i*) (рис. 2, *в*) волокно Δl_α удлиняется ($\dot{e}_\alpha > 0$); волокно Δl_n укорачивается ($\dot{e}_n < 0$). В зависимости от того, где взята точка, волокно Δl_θ может либо укорачиваться, либо удлиняться. В зоне у точки M (*i*) оно укорачивается ($\dot{e}_\theta < 0$), как показано на рис. 2, *в*, а в зоне у точки $П$ (*i*) — удлиняется ($\dot{e}_\theta > 0$). Граница между зонами, на которой $\dot{e}_\theta = 0$, меняет свое положение по времени относительно точек $П$ (*i*) и M (*i*).

Для точки A на образующей M (*i*) O' (рис. 2, *г*) волокно Δl_α удлиняется ($\dot{e}_\alpha > 0$), волокно Δl_θ укорачивается ($\dot{e}_\theta < 0$). Волокно Δl_n в начальный период формоизменения укорачивается ($\dot{e}_n < 0$), если отношение R (*i*)/r достаточно велико. В процессе вытяжки это отношение убывает, и когда оно станет меньше определенного значения, на всей образующей $П_1 M$ (*i*) значение $\dot{e}_n$ становится положительным.

Для точки A (рис. 2, *д*) на образующей $O'K$ (*i*) (см. рис. 1) волокно $\Delta\rho$ удлиняется ($\dot{e}_\rho > 0$), а волокно Δl_θ укорачивается. Волокно Δl_n в зоне у точки K (*i*) (см. рис. 1) удлиняется ($e_n > 0$), а в зоне у точки O' укорачивается ($\dot{e}_n < 0$), если отношение R (*i*)/r достаточно велико. Когда отношение R (*i*)/r уменьшается до опре

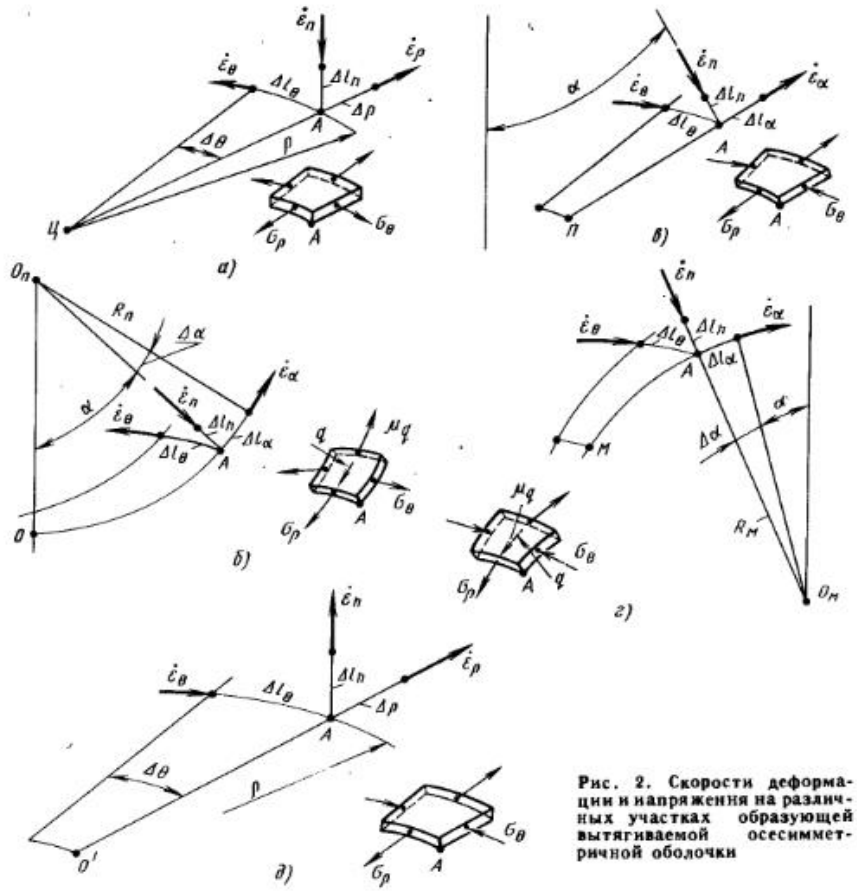


Рис. 2. Скорости деформации и напряжения на различных участках образующей вытягиваемой осесимметричной оболочки

деленного значения, волокно Δl_n для всех точек удлиняется ($\dot{e}_n > 0$).

Схемы напряжений, приведенные на рис. 2, соответствуют схемам скоростей деформаций.

На рис. 3 показана схема распределения вдоль образующей оболочки интенсивности деформации и отношения толщины стенки оболочки к толщине заготовки при коэффициенте вытяжки, близком к предельному.

3. ПРЕДЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ВЫТЯЖКИ

Вытяжка без прижима. Формоизменение при вытяжке без прижима (рис. 4) ограничивается двумя явлениями: при относительно малой толщине заготовки — потерей устойчивости ее краевой области от воздействия сжимающих напряжений σ_θ и образованием здесь волн (гофров); при относительно большой толщине — локализацией деформации и разрывом металла в области контакта полуфабриката с тороидной поверхностью пуансона.

Зависимость предельного коэффициента вытяжки $K_п = D\,(0)/d$ от отношения $s\,(0)/D\,(0)$ представлена на рис. 5. Кривая имеет восходящий характер до $s\,(0)/D\,(0) \approx 0{,}02$. Далее подъем кривой прекращается, и она переходит в горизонталь. Первое явление соответствует восходящей части

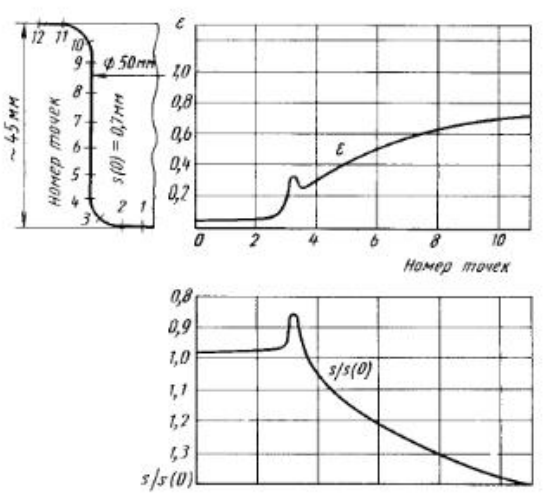


Рис. 3. Распределение интенсивности деформации и толщины вдоль образующей оболочки

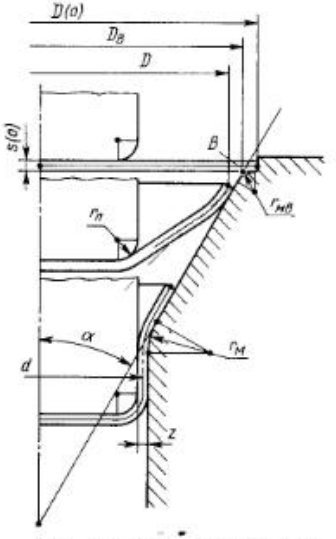


Рис. 4. Схема вытяжки без прижима

кривой, а второе — горизонтальной ее части. В области $0{,}015 \leqslant s\,(0)/D\,(0) \leqslant 0{,}02$ имеется вероятность возникновения как одного, так и другого явления.

Предельные значения коэффициентов вытяжки для области $s\,(0)/D\,(0) > 0{,}02$ составляют $K_п = 2{,}32 \div 2{,}22$ (верхний предел для стали 12Х18Н9Т, нижний — для стали 08Ю).

Вытяжка с прижимом. Для коэффициента анизотропии $r_{ср} = 1{,}1 \div 1{,}6$ и радиусов закруглений матриц $r_м = (5 \div 9)\,s\,(0)$ для сталей марок 08 и 10, латуни Л63 и алюминия среднестатистические предельные коэффициенты вытяжки приведены ниже.

На рис. 6 показана зависимость

$[s\,(0)/D\,(0)]\,100$	2,0—1,5	1,5—1,0	1,0—0,5	0,5—0,2	0,2—0,06
$K_п$	2,0—2,17	1,88—2,0	1,78—1,88	1,72—1,78	1,66—1,72

$K_п\,(r_{ср})$ для низкоуглеродистой стали.

При вытяжке осесимметричным инструментом листового металла, обладающего плоскостной анизотропией, осевая симметрия напряженно-деформированного состояния не сохраняется. В частности, край полуфабриката (рис. 7) имеет не круговой, а волнистый контур. Высоту волны, равную $h_1 + h_2$, необходимо учитывать при разработке технологии и назначении припуска на обрезку.

Существует несколько способов учета и предотвращения воздействия плоскостной анизотропии на формоизменение заготовки при осесимметричной вытяжке: использование некруглой фигурной заготовки, имеющей обратное направление выступов и впадин; применение матриц с переменной по контуру проема кривизной рабочей кромки; дифференцированный нагрев фланца; дифференцированный прижим фланца и др. Построение контура заготов

ки с учетом плоскостной анизотропии особенно эффективно при вытяжке коробчатых деталей.

Среднестатистический предельный коэффициент вытяжки существенно зависит от отношения $s\,(0)/D\,(0)$ (см.

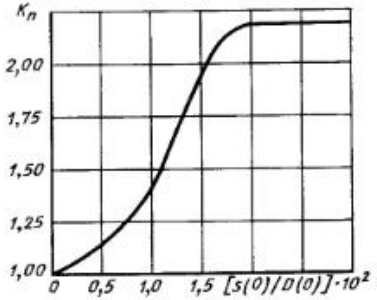


Рис. 5. График для определения предельного коэффициента вытяжки без прижима

рис. 6 и с. 119); на фоне этой зависимости теряется влияние уровня штампуемости листового металла. Зависимость $K_п$ (s (0)/D (0)) может быть значительно ослаблена (и даже устранена полностью) за счет мероприятий по увеличению стойкости вытяжных штампов, совершенствованию их конструкции, контролю состояния штампов и прессов, повышению стабильности технологического смазывания, работы прижимных устройств, в частности, равномерности и постоянства давления прижима по рабочей поверхности и по времени.

Влияние уровня штампуемости стали 08 на коэффициент $K_п$ при устранении влияния соотношения s (0)/D (0) видно из табл. 1. Связь уровня штампуемости и показателя $h_э$ пробы по Эриксену показана в табл. 2.

1. Уровень штампуемости стали в зависимости от показателя степени n кривой упрочнения и предельного коэффициента вытяжки $K_п$

Уровень штампуемости	n	$K_п$
Г	0,20—0,22	1,79—1,82
ВГ	0,22—0,26	1,85—1,89
СВ	0,26—0,29	1,92—2,00
ОСВ	0,29—0,32	2,00—2,04
ВОСВ	Св. 0,32	2,08—2,19

Примечание. Г — глубокая, ВГ — весьма глубокая, СВ — сложная вытяжка, ОСВ — особосложная вытяжка, ВОСВ — весьма особосложная вытяжка.

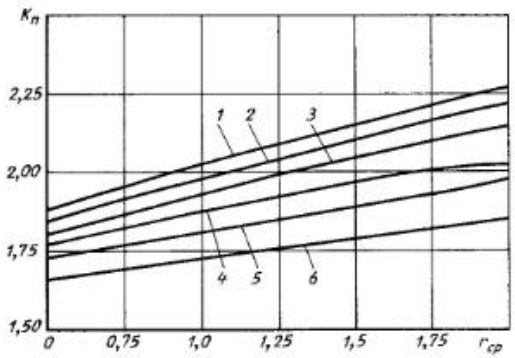


Рис. 6. Зависимость $K_п$ от $r_{ср}$ при [s (0)/D (0)] 10^2:

1 — 2,4; *2* — 2,0; *3* — 1,6; *4* — 1,2; *5* — 0,8; *6* — 0,4

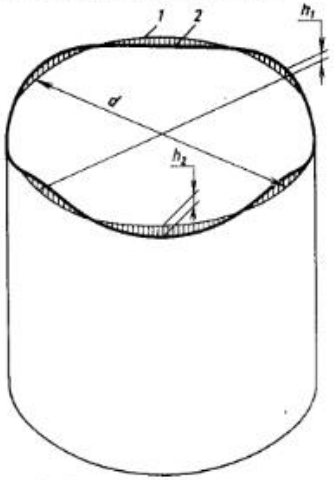


Рис. 7. Схема расположения волн по краю полуфабриката, вытянутого из листового металла, имеющего плоскостную анизотропию:

1 — круговой осредненный контур края; *2* — волнистый контур края

2. Уровень штампуемости стали и показатель $h_э$ технологической пробы по Эриксену (ГОСТ 9045—80)

Толщина листа, мм	$h_э$, мм				Толщина листа, мм	$h_э$, мм			
	ВОСВ	ОСВ	СВ	ВГ		ВОСВ	ОСВ	СВ	ВГ
0,5	9,7	9,4	9,2	9,0	1,3	11,8	11,7	11,4	11,2
0,6	10,0	9,8	9,6	9,4	1,4	11,9	11,8	11,5	11,3
0,7	10,4	10,2	10,0	9,7	1,5	12,0	11,9	11,6	11,5
0,8	10,7	10,6	10,4	10,0	1,6	12,1	12,0	11,7	11,6
0,9	11,0	10,9	10,6	10,3	1,7	12,2	12,1	11,9	11,8
1,0	11,2	11,1	10,8	10,5	1,8	12,3	12,2	12,0	11,9
1,1	11,4	11,3	11,0	10,8	1,9	12,4	12,3	12,1	12,0
1,2	11,6	11,5	11,2	11,0	2,0	12,5	12,4	12,2	12,1

Примечание. ВОСВ, ОСВ, СВ — уровни штампуемости для стали 08Ю; ВГ — для сталей марок 08кп, 08пс.

При D (0)/$d > K_п$ фланец заготовки не может быть втянут полностью в матрицу. При D (0)/$d \leqslant 2K_п$ в начале движения пуансона внешний контур заготовки несколько сокращается, перемещаясь к контуру проема матрицы. Затем перемещение и сокращение контура прекращаются, и формоизменение продолжается только за счет растяжения металла, находящегося внутри контура проема. При этом формоизменение ограничено разрывом металла. Если же D (0)/$d > 2K_п$, при движении пуансона в матрицу внешний контур заготовки остается неподвижным. Вытяжка переходит в местную формовку. Таким образом, если $K_п < D$ (0)/$d \leqslant 2K_п$, одновременно имеют место два вида формоизменения: вытяжка и местная формовка. Причем увеличение глубины оболочки в результате этого при D (0)/d, близком к $K_п$, может составить 30—40 % по сравнению с глубиной при местной формовке, когда D (0)/$d > 2K_п$.

4. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГОТОВКИ И ИНСТРУМЕНТА

Расчет диаметра заготовки. Среднее значение толщины полуфабриката, полученного вытяжкой, приближенно равно толщине s (0) заготовки. Поэтому размеры заготовки определяют из условия неизменности площади срединной поверхности оболочки при ее формоизменении.

Площадь поверхности полуфабриката с учетом припуска на обрезку (рис. 8 и табл. 3, 4) представляют в виде суммы площадей поверхностей простых геометрических форм, из которых можно составить срединную поверхность оболочки.

Последовательность определения диаметра заготовки следующая:

вычерчивают сечение срединной поверхности (срединную линию) (рис. 9,*б*) детали (рис. 9, *а*) с учетом припуска на обрезку;

разбивают срединную линию на отрезки L_i ($i = 1, 2, 3...k$);

находят центры тяжести прямолинейных отрезков и дуг окружностей, причем координаты центров тяжести

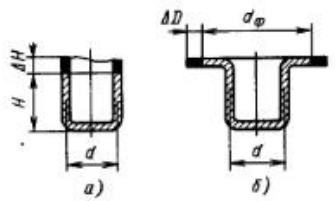


Рис. 8. Припуски на обрезку ΔH (*а*) и ΔD (*б*)

3. Припуски ΔH на обрезку по высоте детали (размеры, мм)

Высота детали H	Относительная высота детали H/d			
	Св. 0,5 до 0,8	Св. 0,8 до 1,6	Св. 1,6 до 2,5	Св. 2,5 до 4,0
10	1,5	1,8	2,3	3,0
20	2,2	3,0	3,7	4,5
50	3,5	4,5	6,0	7,0
100	5,0	6,5	8,5	10,0
150	6,5	8,0	10,5	12,0
200	7,5	9,0	12,0	15,0
250	9,0	11,0	13,5	16,0
300	10,0	13,0	15,0	18,0

4. Припуски ΔD (рис. 8,б) на обрезку по диаметру фланца на сторону (размеры, мм)

Диаметр фланца $d_ф$	Относительный диаметр детали с фланцем $d_ф/d$			
	До 1,5	Св. 1,5 до 2,0	Св. 2,0 до 2,5	Св. 2,5 до 3,0
25	2,5	2,2	2,0	1,5
50	4,0	3,0	2,5	2,5
100	5,0	4,5	3,7	3,0
150	6,0	5,0	4,0	3,5
200	7,0	6,0	5,0	4,0
250	8,0	7,0	5,5	4,2
300	9,0	7,5	6,0	4,5

дуг относительно центров их кривизны определяют с помощью табл. 5 и рис. 10 (центр тяжести прямолинейного отрезка находится на его середине);

вычисляют расстояния ρ_i ($i = 1, 2, 3 \ldots k$) от оси срединной поверхности (оболочки) до центров тяжести отрезков (для дуги оно равно сумме расстояния r_i от оси до центра кривизны дуги и соответствующей координаты ее центра тяжести относительно центра кривизны);

определяют длину дуг: $L_i = R_i\alpha_i$ (значения α_i приведены в табл. 5);

находят диаметр заготовки по формуле

$$D(0) = \left(8\sum_{1}^{k} L_i\rho_i\right)^{1/2}, \qquad (1)$$

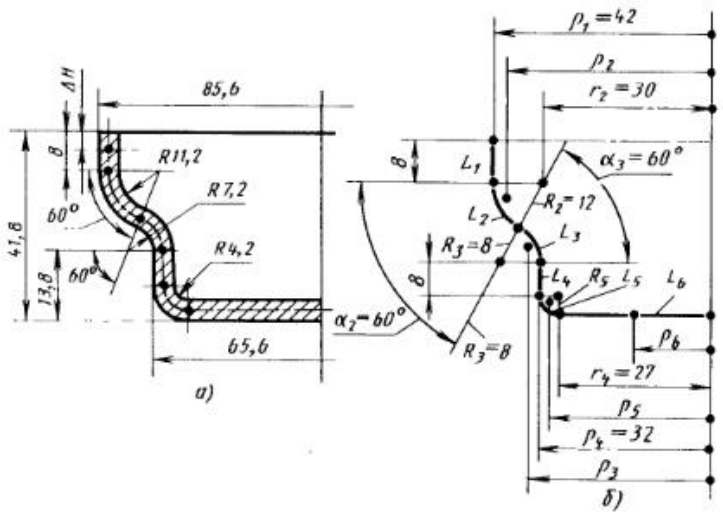


Рис. 9. Эскиз детали [$s(0) = 1{,}6$ мм] и схема разбиения срединной линии на отдельные отрезки для расчета площади поверхности оболочки

5. Координаты центра тяжести дуги единичного радиуса ($R = 1$ мм) (см. рис. 10)

α°	α, рад	x	y	α°	α, рад	x	y
1	0,018	1,000	0,009	46	0,803	0,896	0,380
2	0,035	1,000	0,017	47	0,820	0,891	0,388
3	0,052	1,000	0,026	48	0,838	0,887	0,395
4	0,070	0,999	0,035	49	0,855	0,883	0,402
5	0,087	0,999	0,043	50	0,873	0,879	0,509
6	0,105	0,998	0,052	51	0,890	0,874	0,416
7	0,122	0,998	0,061	52	0,908	0,869	0,423
8	0,140	0,997	0,070	53	0,925	0,864	0,430
9	0,157	0,996	0,078	54	0,942	0,858	0,437
10	0,174	0,996	0,087	55	0,960	0,853	0,444
11	0,192	0,994	0,095	56	0,977	0,848	0,451
12	0,209	0,993	0,104	57	0,995	0,843	0,458
13	0,227	0,992	0,113	58	1,012	0,838	0,464
14	0,244	0,990	0,122	59	1,030	0,832	0,471
15	0,262	0,989	0,130	60	1,047	0,827	0,478
16	0,279	0,987	0,139	61	1,065	0,822	0,484
17	0,297	0,985	0,147	62	1,082	0,816	0,490
18	0,314	0,984	0,156	63	1,100	0,810	0,497
19	0,332	0,982	0,164	64	1,117	0,805	0,503
20	0,349	0,980	0,173	65	1,134	0,799	0,509
21	0,366	0,978	0,181	66	1,152	0,793	0,515
22	0,384	0,976	0,190	67	1,169	0,787	0,521
23	0,401	0,974	0,198	68	1,187	0,781	0,527
24	0,419	0,972	0,206	69	1,204	0,775	0,533
25	0,436	0,969	0,215	70	1,222	0,769	0,538
26	0,454	0,966	0,223	71	1,239	0,763	0,544
27	0,471	0,963	0,231	72	1,257	0,757	0,550
28	0,489	0,960	0,240	73	1,274	0,751	0,555
29	0,506	0,958	0,248	74	1,291	0,745	0,561
30	0,524	0,955	0,256	75	1,309	0,738	0,566
31	0,541	0,952	0,264	76	1,326	0,731	0,572
32	0,558	0,949	0,272	77	1,344	0,725	0,577
33	0,576	0,946	0,280	78	1,361	0,719	0,582
34	0,593	0,942	0,288	79	1,379	0,712	0,587
35	0,611	0,937	0,296	80	1,396	0,705	0,592
36	0,628	0,936	0,304	81	1,414	0,699	0,597
37	0,646	0,932	0,312	82	1,431	0,692	0,602
38	0,663	0,929	0,320	83	1,449	0,685	0,606
39	0,681	0,925	0,327	84	1,466	0,678	0,611
40	0,698	0,921	0,335	85	1,483	0,671	0,615
41	0,716	0,917	0,343	86	1,501	0,665	0,620
42	0,733	0,913	0,350	87	1,518	0,658	0,624
43	0,750	0,909	0,358	88	1,535	0,651	0,628
44	0,768	0,905	0,366	89	1,553	0,644	0,633
45	0,785	0,901	0,373	90	1,571	0,637	0,637

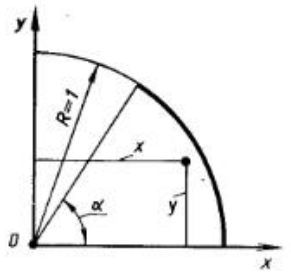


Рис. 10. Координаты центра тяжести дуги окружности с единичным радиусом

где k — число отрезков, на которое разбита срединная линия.

При определении координат центра тяжести дуги окружности, представляющей какую-либо часть срединной линии оболочки, направление осей координат x, y (см. рис. 10), исходящих из центра кривизны дуги, выбирают определенным образом. Например, для дуги радиусом $R_3 = 8$ мм (см. рис. 9) оси координат следует направить так, как показано на рис. 10. Координата центра тяжести дуги с единичным радиусом при $\alpha_3 = 60°$ $x = 0{,}827$. Координата дуги с радиусом R_3 равна произведению $xR_3 = 6{,}62$ мм.

Для дуги радиусом R_2 ось x следует направить по горизонтали (от оси симметрии оболочки (влево), а ось y — вниз. Эти два случая характеризуются тем, что в расчетах используется координата x.

Координата y используется в расчетах для других случаев, когда ось x должна быть направлена не по горизонтали, а по вертикали, т. е. параллельно оси оболочки. Обычно такие случаи имеют место для вогнутого дна оболочки, когда срединная линия составлена из дуг, окружностей, а угол дуг меньше чем 90°.

Аналогичная картина получается для срединной линии оболочек с фигурным волнообразным фланцем.

Если срединная линия сечения оболочки или часть линии представляет собой кривую переменной кривизны, ее делят на отрезки, в пределах которых кривизну можно принять приближенно постоянной.

Пример. Найти произведение $L_2\rho_2$ для второго отрезка срединной линии (см. рис. 9, *б*).

6. Оптимальные значения относительных радиусов кривизны рабочих кромок матрицы и пуансона

Относительный радиус кривизны	$[s(0)/D(0)]\,10^2$					
	Не менее 3	2,0	1,5	1,0	0,5	0,25
$r_м/s(0)$	5	6	8	10	12	14
$r_п/s(0)$	3	4	5	6	8	9

Решение: Начало координат x и y помещаем в центр кривизны дуги радиусом R_2, расположенный на расстоянии $r_2 = 30$ мм от оси оболочки. Ось x направляем по горизонтали. Согласно табл. 5, для угла $\alpha = \alpha_2 = 60°$ координата центра тяжести дуги единичного радиуса $x = 0{,}827$.

Координата центра тяжести дуги радиуса R_2 12 мм равна произведению $xR_2 = 9{,}924$ мм. Расстояние от оси оболочки до центра тяжести этой дуги $\rho_2 = r_2 + xR_2 = 39{,}92$ мм. Длина дуги $L_2 = R_2\alpha_2 = 12 \cdot 1{,}047 = 12{,}56$ мм (согласно табл. 5, угол $\alpha_2 = 1{,}047$ рад). Произведение $L_2\rho_2 = 501{,}4$ мм^2.

Расчет радиусов кривизны рабочих кромок матрицы и пуансона. Радиусы кривизны рабочих кромок матрицы и пуансона существенно влияют на предельный коэффициент вытяжки, деформационные и силовые параметры процесса формоизменения заготовки, устойчивость фланца, стойкость штампа.

При вытяжке с прижимом, если в принятом технологическом процессе коэффициент вытяжки выбран близким к предельному, значения кривизны рабочей кромки матрицы и пуансона должны быть оптимальными (табл. 6). При $K < 0{,}85K_п$ кривизна рабочих кромок может быть увеличена на 30—40% по сравнению со значениями, приведенными в табл. 6.

При вытяжке без прижима (см. рис. 4) угол α конусности матрицы обычно принимают равным 30°; радиусы скруглений рабочих кромок $r_м/s(0) \geqslant 10$; $r_{мв} = (1 \div 1{,}5)\,s(0)$; $r_п/s(0) \geqslant (3 \div 4)$.

7. Значения коэффициента n [см. формулу (5)]

$[s(0)/D(0)]\,10^2$	Коэффициент вытяжки K								
	2,22	2,08	2,0	1,92	1,81	1,66	1,53	1,42	1,33
5,0	0,95	0,85	0,75	0,65	0,60	0,50	0,43	0,35	0,30
2,0	0,10	1,00	0,90	0,80	0,75	0,60	0,50	0,42	0,35
1,2	—	1,10	1,00	0,90	0,80	0,68	0,56	0,47	0,37
0,8	—	—	1,10	1,00	0,90	0,75	0,60	0,50	0,40
0,5	—	—	—	1,10	1,00	0,82	0,67	0,55	0,45
0,2	—	—	—	—	1,10	0,90	0,75	0,60	0,50
0,1	—	—	—	—	—	1,10	0,90	0,75	0,60

Примечание. Значения коэффициента n относятся к вытяжке сталей 08 и 10; для приближенных расчетов их можно использовать и при вытяжке других листовых металлов.

Зазор между цилиндрическими поверхностями матрицы и пуансона. В процессе втягивания фланца заготовки в матрицу в его области, примыкающей к внешнему контуру, толщина s металла увеличивается. Металл, расположенный по внешнему контуру фланца, находится в условиях, близких к условиям одноосного сжатия. Толщину металла $s = s_к$ на внешнем контуре радиусом R можно приближенно найти по следующей формуле (см. рис. 1):

$$s_к = s(0)\,[R(0)/R]^{1/(1+r)}, \qquad (2)$$

где r — коэффициент нормальной анизотропии, который при умеренной плоскостной анизотропии может быть принят равным $r_{ср}$.

Если в конце вытяжки диаметр D внешнего контура сокращается до диаметра d, толщина по кромке вытянутой оболочки

$$s_к = s(0)\,K^{1/(1+r)}, \qquad (3)$$

где $K = D(0)/d$.

Стенка вытянутой оболочки, имеющая толщину $s_к$, поместится в зазоре z между поверхностями инструмента, если

$$z/s(0) \geqslant s_к/s(0) = K^{1/(1+r)}. \qquad (4)$$

В практике при $K = K_п$ принимают $z = (1{,}25 \div 1{,}40)\,s(0)$.

Если увеличение толщины стенки чертежом детали не допускается, зазор может быть уменьшен до значения $z = (1{,}00 \div 1{,}03)\,s(0)$ (при коэффициенте вытяжки, близком к предельному). При этом требования к износостойкости и прочности инструмента, а также к смазочному материалу повышаются (приближаются к соответствующим требованиям при вытяжке с утонением стенки).

Когда при использовании одного и того же инструмента совмещаются два вида формоизменения — вытяжка и вытяжка с утонением (комбинированная вытяжка), зазор z принимают меньше $s(0)$. Комбинированная вытяжка в конической матрице (см. рис. 4) заготовок из сталей 08кп, 12Х18Н10Т протекает успешно при $z \approx 0{,}7s(0)$, а из алюминия и латуни Л63 — при $z \approx 0{,}6s(0)$.

5. РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ, РАБОТА ДЕФОРМАЦИИ

Усилие вытяжки. При полном втягивании заготовки в матрицу (диаметр D контура сокращается до диаметра d) на зависимость усилия $P_п$ на пуансоне от перемещения пуансона

существенно влияет соотношение между значениями $s_к/s\,(0)$ и $z/s\,(0)$.

При $z/s\,(0) \geqslant s_к/s\,(0)$ кривая (5) имеет восходящую и нисходящую части. На восходящей части имеется точка перегиба, расположенная ближе к оси u, чем к точке максимума. Положение (координаты) точки максимума, $P_п = P_{max}$, $u = u_м$, зависит от значения коэффициента вытяжки и отношения $(r_м + r_п)/s\,(0)$, при $K = K_п$ и оптимальных значениях $r_м$ и $r_п$ (см. табл. 6) $u_м = (0{,}4 \div 0{,}6)\,H$, где H — высота оболочки, равная перемещению пуансона к моменту времени, когда кромка заготовки достигает плоскости центров кривизны $r_м$ кромки радиуса. Усилие

$$P_{max} = n\pi\, d\sigma_в s\,(0),$$

где n — коэффициент, зависящий от коэффициента вытяжки (см. табл. 7).

При $1 < z/s\,(0) < s_к/s\,(0)$ восходящая часть кривой и положение точки максимума, а также значение P_{max}, почти не изменяются. Меняет вид только нисходящая часть. Падение усилия замедляется. При значениях $z/s\,(0)$, близких к единице, после некоторого временного падения усилия наблюдается новый подъем кривой, не превышающий P_{max}. При $z/s\,(0) < 1$, по мере уменьшения зазора, участок временного падения усилия сокращается, а максимальное усилие на участке нового подъема кривой возрастает.

Этот участок исчезает и усилие в точке максимума больше усилия, найденного по формуле (5) приблизительно в 1,5 раза, когда $z/s\,(0) = 0{,}6 \div 0{,}7$.

Усилие прижима. Усилие прижима, необходимое для предотвращения потери устойчивости заготовки,

$$Q = Fq, \qquad (6)$$

где $F = 0{,}25\pi\,[D^2\,(0) - (d + s\,(0) + 2r_м)^2]$;

$$q = 10^{-4}\sigma_в\,(K - 1{,}2)\,D\,(0)/s\,(0). \qquad (7)$$

Работа деформации. Работа деформации заготовки при вытяжке при полном втягивании заготовки в матрицу

$$A = (0{,}6 \div 0{,}8)\,P_{max}H, \qquad (8)$$

где H — высота вытягиваемой оболочки.

Прижим совершает работу, если он движется в процессе вытяжки, а усилие прижима Q остается примерно постоянным: работа прижима

$$A_п = QH. \qquad (9)$$

6. ТОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ВЫТЯЖКОЙ

Отклонения по диаметру и высоте цилиндрических полых деталей приведены в табл. 8—10.

Отклонения от плоскостности дна детали даны в табл. 11.

Поле допуска любого диаметрального размера детали принимают $h11$ и $H11$. После вытяжки деталь, как правило, подвергают обрезке, для чего предусматривают припуск на обрезку.

8. Отклонения по диаметру цилиндрических полых деталей без фланца после вытяжки (% от диаметра)

Коэффициент вытяжки	Первая вытяжка			Калибровка		
	$[s\,(0)/D\,(0)]\,10^2$					
	2,0—1,0	1,0—0,3	0,3—0,1	2,0—1,0	1,0—0,3	0,3—0,1
1,25	0,3	0,4	0,5	0,12	0,16	0,2
1,42	0,4	0,5	0,6	0,16	0,20	0,25
1,66	0,5	0,6	0,7	0,20	0,25	0,3
2,0	0,6	0,7	—	0,25	0,30	—

9. Отклонения (±)по высоте цилиндрических полых деталей без фланца после вытяжки (размеры, мм)

Толщина материала $s\,(0)$	Высота детали						
	До 18	Св. 18 до 30	Св. 30 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 120	Св. 120 до 180	Св. 180 до 260
До 1	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8
Св. 1—2	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0
» 2—4	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,5
» 4—6	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,5	3,0

10. Отклонения (±) по высоте цилиндрических полых деталей с фланцем после вытяжки (размеры, мм)

Толщина материала $s\,(0)$	Высота детали						
	До 18	Св. 18 до 30	Св. 30 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 120	Св. 120 до 180	Св. 180 до 260
До 1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
Св. 1—2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,2	1,4
» 2—4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,4	1,6
» 4—6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,2	1,6	1,8

11. Отклонения от плоскостности дна детали (размеры, мм)

Толщина материала $s\,(0)$	Диаметр детали				
	До 75	Св. 75 до 150	Св. 150 до 250	Св. 250 до 500	Св. 500
До 0,4	0,5	0,7	0,9	1,3	1,5
Св. 0,4 до 1,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,8
» 1,2 » 2,0	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
» 2,0 » 3,5	0,25	0,35	0,5	0,6	0,8
» 3,5	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7

Вытяжкой без припуска на обрезку изготавливают неглубокие детали с коэффициентом вытяжки $K = 1{,}25 \div 1{,}42$. При этом точность по высоте детали соответствует 8—10 квалитету при изготовлении детали в штампе совмещенного действия и 10—12 квалитету — в штампе простого действия.

7. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Исходные данные: материал детали (см. рис. 9, *а*) — сталь 08кп; толщина $s\,(0) = 1{,}6\ (\pm 0{,}15)$ мм; временное сопротивление $\sigma_в = 340$ МПа; предел текучести $\sigma_т = 242$ МПа; показатель

12. Геометрические параметры заготовки

№ участка *	L_i	ρ_i	$L_i\rho_i$
1	8	42	336
2	$\alpha_2 R_2 = 1{,}047 \cdot 12 = 12{,}6$	$30 + xR = 30 + 0{,}827 \cdot 12 = 30 + 9{,}9 = 39{,}9$	503
3	$\alpha_3 R_3 = 1{,}047 \cdot 8 = 8{,}4$	$32 + 8 - xR = 32 + 8 - 0{,}827 \cdot 8 = 33{,}4$	280
4	8	32	256
5	$\alpha_5 R_5 = 1{,}571 \cdot 5 = 7{,}8$	$27 + xR = 27 + 0{,}637 \cdot 5 = 30{,}2$	236
6	27	13,5	365

* См. индексы размеров α, R, L, ρ на рис. 9, *б*.

степени кривой упрочнения $n = 0{,}285$; коэффициент анизотропии $r_{ср} = 1{,}5$; припуск на обрезку (см. табл. 3) $\Delta H = 3{,}5$ мм.

Последовательность расчета технологических параметров следующая.

1. Расчет диаметра заготовки. Находим произведение $L_i\rho_i$, входящее в формулу (1) (табл. 12).

Диаметр заготовки определяем по формуле (1):

$$D\,(0) = [8\,(336 + 503 + 280 + 256 + 236 + 365)]^{1/2} \approx 126 \text{ мм}.$$

Коэффициент вытяжки определяем по участку оболочки, расположенному у дна. Диаметр этого участка по срединной поверхности $d = 64$ мм. Коэффициент вытяжки $K = 126/64 = 1{,}97$. Среднестатистический предельный коэффициент вытяжки (см. с. 119) $K_п = 1{,}88 \div 2{,}0$, а согласно графику, приведенному на рис. 6 (кривая *4*), $K_п = 1{,}97$. Штампуемость стали ($n = 0{,}285$) соответствует уровню СВ и по табл. 1 — ближе к правой границе интервала 1,92—2,0. Следовательно, для формообразования детали требуется одна вытяжная операция при использовании ступенчатых матрицы и пуансона.

Радиус кривизны кромки верхней ступени матрицы принимаем по табл. 6 равным $9s$ (0), т. е. $r_м = 14{,}4 \approx 15$ мм. Радиус кривизны кромки пуансона должен быть не меньше $5{,}5s$ (0), принимаем $r_п = 9$ мм. Следовательно, после операции вытяжки следует ввести операцию калибровки торондальной поверхности, примыкающей к диу детали, для увеличения ее кривизны от 1/9 до 1/4,2 мм$^{-1}$.

Зазор z назначаем с учетом того, что толщина стенки оболочки, согласно формуле (2) при подстановке в нее $R\,(0) = D\,(0)/2 = 63$ мм; $R = \rho_1 = 42$ мм и $r = r_{ср} = 1{,}5$ составляет

$$s_к = 1{,}88 \text{ мм}.$$

Для того чтобы не возникало принудительного утонения стенки, зазор, с учетом положительного отклонения начальной толщины, должен быть принят $z = 2$ мм.

Максимальное усилие вытяжки находим по формуле (4). Расчет ведем для $d = 64$ мм. Согласно табл. 8 $n \approx 1$,

$$P_{max} = \pi 64 \cdot 340 \cdot 1{,}6 \approx 110 \text{ кН}.$$

Устойчивость фланца заготовки согласно графику, приведенному на рис. 5, недостаточна. В вытяжном штампе должно быть прижимное устройство.

Усилие прижима находим по формуле (6), причем при вычислении F диаметр d должен быть принят равным $2\rho_1 = 84$ мм (см. рис. 9, *б*), а $r_м = 15$ мм. Таким образом, получаем

$$F = 0{,}25\pi\,[126^2 - (84 + 1{,}6 + 2 \cdot 15)^2] = 1974 \text{ мм}^2.$$

Давление на поверхности прижима по формуле (7)

$$q = 10^{-4} \cdot 340\,(1{,}97 - 1{,}2) \times 126/1{,}6 \approx 2{,}1 \text{ МПа}.$$

Усилие прижима

$$Q = 1974 \cdot 2{,}1 = 4145 \text{ Н} \approx 4{,}2 \text{ кН}.$$

Работу деформации заготовки при вытяжке вычисляем по формуле (8):

$$A_в = 0{,}8 \cdot 110 \cdot 42 \approx 3{,}7 \text{ кДж}.$$

При вытяжке на кривошипном прессе простого действия, осиащенном пневмоподушкой, работа прижима (пневмоподушки)

$$A_п = 4{,}2 \cdot 42 \approx 0{,}17 \text{ кДж}.$$

Глава 5 МНОГООПЕРАЦИОННАЯ ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ВЫТЯЖКА

1. ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЗАГОТОВКИ

Высота деталей, получаемых однооперационной вытяжкой, не превышает 0,7—0,8 их диаметра. При необходимости получения более высоких осесимметричных деталей вводят несколько следующих друг за другом операций вытяжки, на каждой из которых в качестве заготовки используют цилиндрический полуфабрикат, полученный на предыдущей операции, т. е. применяют многооперационную вытяжку (рис. 1).

Многооперационную вытяжку осуществляют на матрицах с тороидальной (рис. 2, *а*) и конусно-тороидальной (рис. 2, *б*) рабочими полостями. Рабочие поверхности матриц могут быть дополнены реактивной (опорной) поверхностью (рис. 2, *в*).

Схема напряженного состояния при последующих операциях вытяжки заготовки на тороидальной матрице показана на рис. 3. Очаг деформации можно разделить на две зоны: *I* — свободного изгиба (вне контактная деформация) и *II* — контактную (деформирование на кромке матрицы).

При вытяжке на матрице с тороидальной поверхностью напряженне в опасном сечении

$$\sigma_{\rho\,max} = \sigma_s \{\ln R_з/r_{ср} + s(0)/2R_\rho + s(0)/[2r_м + s(0)]\}(1 + \mu\alpha_1), \quad (1)$$

где $R_з$ — средний радиус заготовки; $r_{ср}$ — средний радиус детали; μ — коэффициент трения; $s(0)$ — толщина заготовки;

$$\cos\alpha_1 = 1 - (R_з - r_{ср})/[R_\rho + r_м + s(0)/2]; \quad (2)$$

$$R_\rho = \sqrt{R_з s(0)}/\sin\alpha_1; \quad (3)$$

$$\sin\alpha_1/2 = [\sqrt{R_з s(0) + 4[2r_м + s(0)](R_з - r_{ср})} - \sqrt{R_з s(0)}]/[4r_м + 2s(0)]. \quad (4)$$

Для определения $\sigma_{\rho\,max}$ следует найти значение α_1, затем по α_1 значение R_ρ.

На рис. 4 показана схема напряженного состояния заготовки при последующих операциях вытяжки на конусно-тороидальной матрице. В этом случае в очаге деформации можно выделить три зоны: *I* — свободного изгиба (внеконтактная деформация); *II* — контактной деформации на конусном участке и *III* — контактной деформации на торообразном участке матрицы.

Характер напряжений и деформаций в зонах *I* и *III* очага деформации на конусно-тороидальной матрице соответствует характеру напряжений и деформаций зон *I* и *II* при вытяжке на матрице с тороидальной полостью (см. рис. 3). В конусной части матрицы материал находится в плосконапряженном и объемно-деформированном состоянии. Максимальное растягивающее напряжение при вытяжке на конусно-торондальной матрице

$$\sigma_{\rho\,max} = \sigma_s [(1 + \mu/\mathrm{tg}\,\alpha_к - \sqrt{s(0)/R_з}\,\mu\cos\alpha_к)(1 - r_{ср}/R_з) + \sqrt{s(0)/R_з}\sin\alpha_к + s(0)/2r_м + s(0)](1 + \mu\alpha_к), \quad (5)$$

где $\alpha_к$ — угол конусности матрицы.

Оптимальное значение угла конусности $\alpha_к$ в каждом конкретном случае может быть определено по формуле

$$\sin\alpha_к = \sqrt{\mu\sqrt{R_з/s(0)}(1 - r_{ср}/R_з)}. \quad (6)$$

Практическое значение $\alpha_к$ при многооперационной вытяжке принимается в пределах 15—20°. Из сопоставления

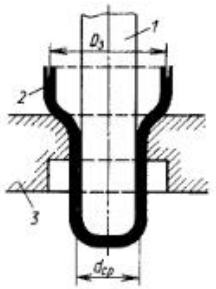


Рис. 1. Многооперационная вытяжка:
1 — пуансон; *2* — заготовка; *3* — матрица

схем напряженного состояния заготовок, показанных на рис. 3 и 4, видно, что при вытяжке на матрице с конусно-тороидальной полостью могут быть реализованы более жесткие условия деформирования, поскольку изгибающие напряжения на участке свободного изгиба и на тороидальном участке матрицы значительно меньше тех, которые имеют место при вытяжке на тороидальной матрице.

По завершении процесса вытяжки в зоне *I* между очагами деформации и цилиндрическими стенками исходной заготовки действует изгибающий момент, приводящий к изгибу элементов, поступающих в очаг деформации. При этом в стенках заготовки, находящихся над очагом деформации, возникают тангенциальные напряжения растяжения. В результате происходит увеличение диаметральных размеров краевой части заготовки, и возникающая в ней тангенциальная деформация растяжения приводит к разрушению края заготовки с образованием продольных трещин.

Для получения качественных деталей многооперационную вытяжку целесообразно проводить на матрицах, имеющих опорную полость (см. рис. 2, *в*), препятствующую образованию раструба по краю цилиндрической стенки вытягиваемой оболочки.

С учетом анизотропии материала выражения для определения максимальных растягивающих напряжений принимают вид:

для матрицы с тороидальной полостью

$$\sigma_{\rho\,max} = [\sigma_s A\cos(\Omega - \omega_0) + \sigma_s s(0)/2r_м + s(0)](1 + 1{,}6\mu); \quad (7)$$

для конусно-тороидальной матрицы

$$\sigma_{\rho\,max} = [\sigma_s A\cos(\Omega - \omega_0) + \sigma_s s(0)\sin\alpha_к/2r_м + s(0)](1 + \mu\alpha_к); \quad (8)$$

при вытяжке на тороидальной матрице

$$\Omega = \arccos\left[\frac{1}{1 + 1{,}6\mu} - \frac{1}{A(2\bar{r}_м + 1)} - \frac{s(0)\sqrt{1 + 2r_{min}}}{A\sqrt{d_{i-1}s(0)}}\right] + \omega_0; \quad (9)$$

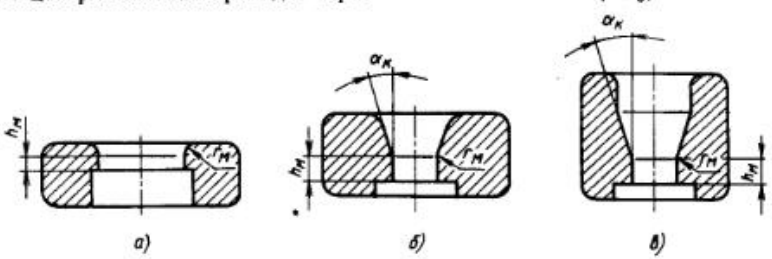


Рис. 2. Матрицы для многооперационной вытяжки:
а — тороидальная; *б* — конусно-торондальная; *в* — с реактивной полостью

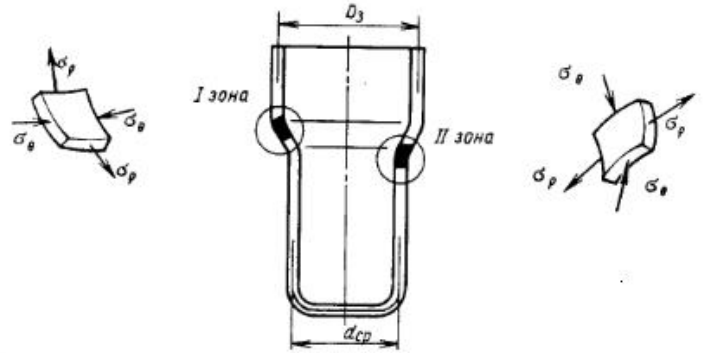


Рис. 3. Схема напряженного состояния в I и II зонах при вытяжке на тороидальной матрице

при вытяжке на конусно-тороидальной матрице

$$\Omega = \arccos\left\{\frac{1}{1+\alpha_к\mu} - \sin\alpha_к \times \right.$$

$$\left. \times\left[\frac{1}{A\,(2\bar{r}_м+1)} + \frac{s(0)\sqrt{1+2r_{\min}}}{A\sqrt{d_{i-1}s(0)}}\right]\right\} + \omega_0; \quad (10)$$

$$\omega_0 = \operatorname{arctg}\frac{1}{\sqrt{1+2r_{\min}}}; \quad (11)$$

$$A = (1+r_{\min})/\sqrt{1+2r_{\min}}, \quad (12)$$

где $\bar{r}_м = r_м/s\,(0)$ — относительный радиус матрицы; d_{i-1} — диаметр полуфабриката на предыдущей операции.

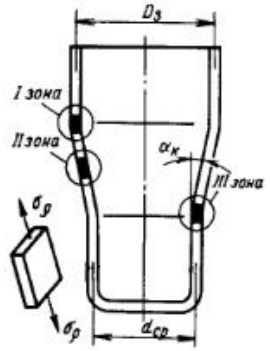


Рис. 4. Схема напряженного состояния во II зоне при вытяжке на конусно-тороидальной матрице

Величины ω_0 и A в зависимости от минимального значения коэффициента анизотропии $r_{\min}$ могут быть найдены с помощью графиков, показанных на рис. 5 и 6.

Значение параметра Ω для случая вытяжки на тороидальной матрице может быть также определено с использованием графиков (рис. 7, *а—г*):

$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4, \quad (13)$$

где Ω_1, Ω_2, Ω_3, Ω_4 — соответственно зависимости от минимального коэффициента анизотропии $r_{\min}$ (см. рис. 7, *а*), относительного радиуса

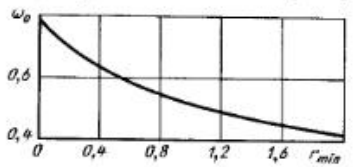


Рис. 5. Зависимость параметра ω_0 от $r_{\min}$

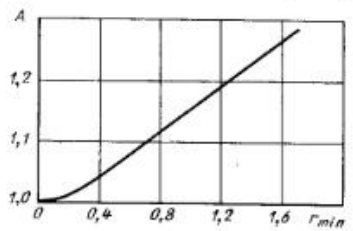


Рис. 6. Зависимость параметра A от $r_{\min}$

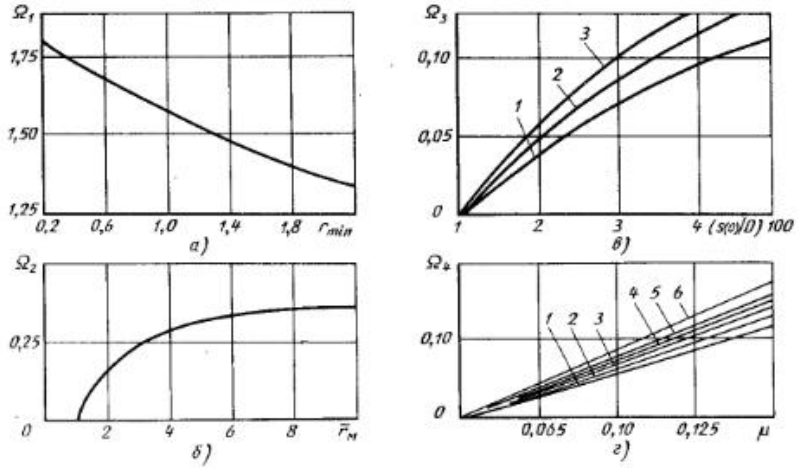


Рис. 7. Характер изменения параметров Ω_1 — Ω_4:
а — $\Omega_1 = f(r_{\min})$ при $[s(0)/D]\ 100 = 1$, $\bar{r}_м = 1$, $\mu = 0{,}05$; *б* — $\Omega_2 = f(\bar{r}_м)$ при $\mu = 0{,}05$; *в* — $\Omega_3 = f\{[s(0)/D]\ 100\}$ (*1* — $\mu = 0{,}05$; *2* — $\mu = 0{,}10$; *3* — $\mu = 0{,}15$); *г* — $\Omega_4 = f(\mu)$ (*1* — $\bar{r}_м = 1$; *2* — $\bar{r}_м = 2$; *3* — $\bar{r}_м = 3$; *4* — $\bar{r}_м = 4$; *5* — $\bar{r}_м = 5$ и *6* — $\bar{r}_м = 10$)

матрицы $\bar{r}_м$ (см. рис. 7, *б*), относительной толщины заготовки $[s(0)/D_3] \times 100$ (см. рис. 7, *в*) и коэффициента трения μ (см. рис. 7, *г*). Поскольку в практических условиях $\mu \leqslant 0{,}05$, пользоваться зависимостью $\Omega_4 = f(\mu)$ (см. рис. 7, *г*) следует только при работе без смазочного материала или при изношенной поверхности матрицы.

В табл. 1 приведены значения предела текучести $\sigma_т$ и коэффициентов анизотропии r_α в зависимости от угла вырезки образцов к направлению прокатки для различных материалов.

Многооперационной вытяжкой изготовляют детали как с узким, так и с широким фланцем. Цилиндрические оболочки с узким фланцем, когда отношение высоты оболочки к ее диаметру больше единицы, а отношение диаметра фланца к диаметру оболочки составляет 1,1—1,4, изготовляют обычной многооперационной вытяжкой, получая на предыдущих операциях цилиндрические полуфабрикаты. Фланец у таких деталей образуется на последней операции, а затем обрезается на заданный размер (рис. 8, *а*). Широкий фланец при многооперационной вытяжке получают сразу на первой операции вытяжки из плоской заготовки. На последующих операциях размеры фланца остаются постоянными, а формоизменению подвергается оставшаяся часть заготовки (рис. 8, *б*).

При определенных геометрических соотношениях диаметра детали и диаметра исходной заготовки действие сжимающих тангенциальных напряжений вызывает потерю устойчивости материала заготовки, выражающуюся в образовании складок. Возможность потери устойчивости заготовки зависит от степени деформации, относительной толщины заготовки и свойств материала. Устойчивость фланца будет тем больше, чем толще исходная стенка заготовки при данном диаметре и меньше разность между диаметром заготовки и диаметром получаемой детали. Заготовка из нержавеющего материала более склонна к складкообразованию, чем отожженная заготовка.

Складкообразование при вытяжке можно устранить, если в конструкции штампа использовать специальный прижим. В связи с этим различают два способа многооперационной вы-

1. Значения $\sigma_т$ и r_α для различных материалов в зависимости от угла вырезки образцов к направлению прокатки

Материал	$\sigma_т$, МПа			r_α		
	Угол вырезки образца, ...°					
	0	45	90	0	45	90
Сталь:						
08кп	208,3	255,8	218	1,306	0,704	2,122
12Х18Н9Т	362,3	336,1	360,4	0,768	1,153	0,759
10 (отожженная)	280	270	280	0,804	0,833	0,796
Ст.3сп	280	270	280	0,876	0,989	0,932
11ЮА	243	208	290	1,00	1,50	1,250
Сплав:						
АМц	72,7	65,1	78,8	0,279	0,965	0,328
АМг6М	171	160	171	0,725	0,820	0,653
АМг2М	68	62	66	0,538	0,706	0,471
Латунь:						
Л63	215	210	225	0,666	0,820	0,759
Л63 (отожженная)	116	105	111,8	0,866	1,031	0,806

тяжки — с прижимом и без прижима. В зависимости от размеров детали, ее формы, толщины материала и числа операций могут быть приняты различные схемы прижима.

Так, при вытяжке деталей без фланца и с фланцем используется схема прижима, показанная на рис. 9, *а*. Если изготовляется ступенчатая оболочка с большими радиусами в месте сопряжения ступеней, то следует использовать схему, приведенную на рис. 9, *б*. На рис. 9, *в* показана схема прижима, используемая при вытяжке ступенчатой оболочки с малыми радиусами сопряжения ступеней. Высокие детали из тонколистового материала изготовляют вытяжкой с прижимом. Необходимость применения прижима при многооперационной вытяжке определяется соотношением $s(0)/D_з$ и значением коэффициента вытяжки K.

При $[s(0)/D_з]\,100 < 1$ и $K > 1{,}25$ вытяжку нужно вести с прижимом. При $[s(0)/D_з]\,100 > 2$ и $K < 1{,}25$ вытяжка осуществляется без прижима.

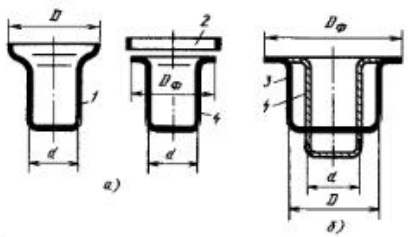


Рис. 8. Вытяжка с фланцем:
1 — последняя вытяжка; *2* — отход; *3* — предпоследняя вытяжка; *4* — деталь

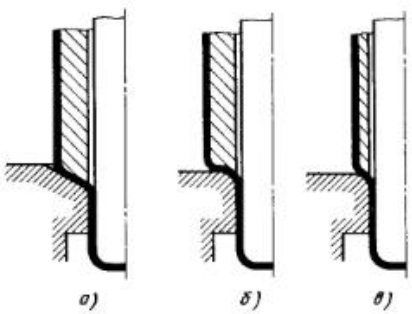


Рис. 9. Схемы прижима на последующих вытяжках:
а — на конусно-тороидальной матрице; *б* — на торондальной матрице с большим раднусом; . *в* — на тороидальной матрице с малым радиусом

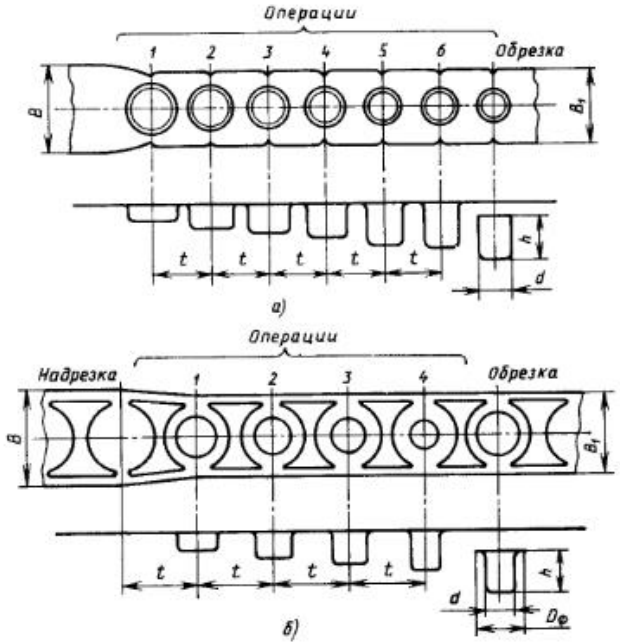


Рис. 10. Последовательная вытяжка в ленте

В общем случае необходимость использования прижима определяют по формуле

$$[s(0)/D_з]\,100 \leqslant (5 \div 7)\,(K_{n-1}/K_n), \qquad (14)$$

где K_n и K_{n-1} — коэффициенты вытяжки на предыдущей и последующей операциях соответственно.

Толщина стенки оболочки на каждой операции неодинакова. На ее краю возникает утолщение материала, величина которого зависит от относительных диаметров заготовки и получаемой детали, а также от анизотропии листового материала.

Толщина края детали может быть определена по выражению

$$s_{max} = s(0)\,K^f, \qquad (15)$$

где

$$f = -1/(1 + r_\alpha). \qquad (16)$$

Для изотропного материала

$$s_{max} = s(0)\,K^{1/2}. \qquad (17)$$

Изменение толщины стенки имеет место и в донной части цилиндрической заготовки. Наименьшая толщина стенки (на 10—15 % меньше исходной) наблюдается на тороидальном участке в месте сопряжения цилиндрической стенки с дном, а при вытяжке на конусно-тороидальной матрице утонение стенки происходит на участке сопряжения конической поверхности с дном и составляет 15—20 % от исходной толщины стенки.

Одним из видов многооперационной вытяжки является многооперационная последовательная вытяжка в ленте без промежуточного отжига, осуществляемая на последовательных вытяжных штампах, устанавливаемых обычно на кривошипных прессах с автоматической подачей ленты. Различают два способа вытяжки в ленте: без надрезки ленты (рис. 10, *а*) и с надрезкой ленты (рис. 10, *б*). Вытяжка в целой ленте характеризуется большим числом операций и может быть рекомендована для изготовления мелких деталей с малым

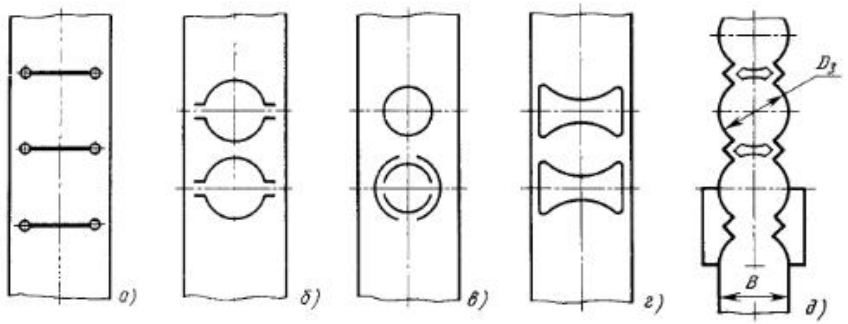


Рис. 11. Форма надрезов в ленте:
а — для прямоугольных деталей; *б* — для деталей большого диаметра; *в* — при использовании фиксаторов; *г* — с вырубкой перемычек; *д* — для деталей малого диаметра

фланцем $D_ф = (1{,}1 \div 1{,}2)\,d$ и $s\,(0) \geqslant 0{,}05d$.

Вытяжку с надрезкой ленты можно использовать для получения деталей с $D_ф > 1{,}2d$ и $s\,(0) < 0{,}05d$. Форму надрезки ленты (рис. 11) выбирают в зависимости от конфигурации детали. Так, надрезку по форме, показанную на рис. 11, *а*, применяют при вытяжке прямоугольных коробок. При вытяжке круглых деталей большого диаметра с $s\,(0) \leqslant 1$ мм используют форму надреза, приведенную на рис. 11, *б*. В случае применения надрезки формы (см. рис. 11, *в*) изменения ширины ленты при штамповке не происходит. Это позволяет вести вытяжку в ленте в штампе с шаговым ножом.

При форме надрезки, показанной на рис. 11, *г*, вырезается поперечная перемычка, в результате чего лента сужается и применение фиксаторов невозможно. Такую форму надрезов рекомендуется использовать при вытяжке круглых деталей малого диаметра. Форма надрезов, показанная на рис. 11, *д*, дает возможность использования лент с меньшей шириной $B = D_3$. Такую форму надрезов также применяют при вытяжке круглых деталей малого диаметра.

2. ПРЕДЕЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЫТЯЖКИ

Число операций, необходимое для получения готовой детали, зависит от ее высоты и диаметра, относительной толщины заготовки $s\,(0)/d$ и механических свойств материала. Проектируемый технологический процесс должен содержать минимально возможное число операций. Это обеспечивается на каждой операции таким изменением поперечного сечения заготовки и таким уменьшением толщины стенки в опасном сечении, чтобы напряжения и деформации, возникающие в материале, не приводили к его разрушению.

Суммарное значение коэффициента вытяжки за n-е число операций определяется по выражению

$$K = D_3/d_n, \qquad (18)$$

где d_n — диаметр цилиндрического участка оболочки, вытягиваемой на n-й операции.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов вытяжки цилиндрических оболочек без фланца из сталей марок 08, 10 и латуней Л59—Л80 на тороидальной матрице с прижимом, без промежуточного отжига.

Вытяжку цилиндрических оболочек с небольшим флайцем ($D_ф/d = 1{,}1 \div 1{,}4$ при $H/d > 1{,}0$) осуществляют так же, как вытяжку оболочек без фланца. При этом могут быть использованы те же коэффициенты вытяжки (см. табл. 2). Фланец у таких оболочек образуется под прижимом штампа только на завершающей операции.

Оболочки с большим фланцем вытягивают так, чтобы фланец образовался на первой операции вытяжки из плоской заготовки. В дальнейшем размеры фланца не изменяются, а формоизменяется остальная часть оболочки.

2. Коэффициенты вытяжки цилиндрических оболочек с прижимом на тороидальной матрице

Коэффициент вытяжки K_i	Относительная толщина заготовки $[s\,(0)/D_3]\,100$				
	2—1,5	1,5—1,0	1,0—0,6	0,6—0,3	0,3—0,1
K_1	1,88—1,96	1,78—1,88	1,72—1,78	1,66—1,72	1,61—1,66
K_2	1,28—1,31	1,26—1,28	1,23—1,26	1,21—1,23	1,20—1,28
K_3	1,25—1,26	1,23—1,25	1,21—1,23	1,20—1,21	1,17—1,20
K_4	1,19—1,21	1,17—1,19	1,16—1,17	1,14—1,16	1,12—1,14
K_5	1,14—1,17	1,09—1,14	1,08—1,09	1,07—1,08	1,06—1,07

3. Предельные значения коэффициентов вытяжки цилиндрических оболочек без прижима на конусно-тороидальной матрице

d_2/d_1	Относительная толщина заготовки $[s\,(0)/D_3]\,100$				
	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
0,6	2,0	1,92	1,86	1,78	1,72
0,7	1,72	1,66	1,60	1,56	1,51
0,8	1,51	1,47	1,42	1,38	1,33

Примечание: d_2/d_1 — отношение нижнего диаметра конуса матрицы к верхнему.

4. Коэффициенты вытяжки для последовательной вытяжки в ленте толщиной 1 мм с надрезами

Материал	Коэффициент вытяжки K_i операции	
	первой	последующих
Сталь низкоуглеродистая	1,65—1,72	1,17—1,20
Латунь Л63, Л68	1,72—1,81	1,20—1,25

Возможная деформация будет зависеть от относительной толщины исходной заготовки, определяющей устойчивость фланца.

Предельные значения коэффициентов вытяжки цилиндрических оболочек из низкоуглеродистых сталей и латуней на конусно-тороидальных матрицах без прижима и без промежуточного отжига приведены в табл. 3.

Вытяжка в целой ленте сопровождается формоизменением всей ленты. Поэтому для устранения влияния действительных напряжений $\sigma_{\rho\,max}$, превышающих расчетные, и устранения разрушения ленты коэффициенты вытяжки принимают меньше, чем при обычной вытяжке. В табл. 4 приведены значения для последовательной вытяжки в ленте с надрезами. Коэффициенты вытяжки для последовательной вытяжки в целой ленте из латуни и низкоуглеродистых сталей:

Переход	K_i
1	1,38—1,47
2	1,17—1,25
3	1,14—1,21
4	1,11—1,17
5	1,08—1,14
6	1,05—1,11

В зависимости от выбранных значений коэффициентов вытяжки и характеристик применяемого материала

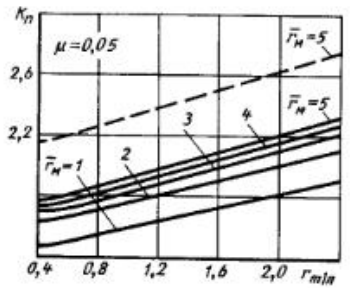


Рис. 12. Графики для определения $K_п = f(r_{min})$ при вытяжке на торондальной матрице

многооперационную вытяжку осуществляют с предварительной термической обработкой материала или без нее.

В случае многооперационной вытяжки деталей из сильноупрочняющихся материалов в технологическом процессе следует предусмотреть межоперационную термическую обработку. В результате отжига в окислительной среде на поверхности детали образуется окалина, которую удаляют травлением или механической очисткой. Состав ванн для травления подбирают в зависимости от рода материала. После травления для удаления следов кислоты с деталей их промывают в холодной и горячей воде, а затем нейтрализуют в слабом щелочном растворе при температуре 60—80 °С.

Предпочтительным является безокислительный (светлый) отжиг в печах с нейтральной или восстановитель-

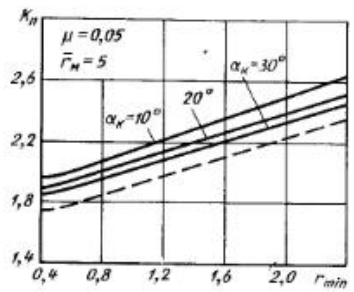


Рис. 13. Графики для определения $K_п = f(r_{min})$ при вытяжке на конусно-торондальной матрице

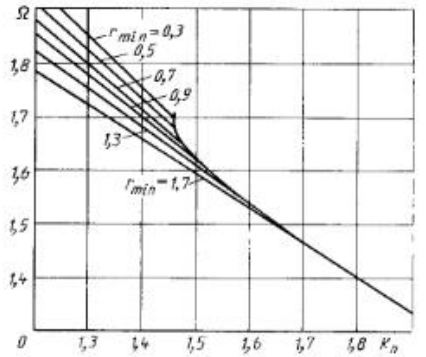


Рис. 14. Изменение параметра $\Omega = f(K_п)$ при вытяжке на радиальных матрицах $[s(0)/D_з]\ 100 = 1$ в зависимости от r_{min}

ной средой, в результате которого не происходит образования окалины и не требуется выполнения операций травления.

Если в технологическом процессе предусмотрен межоперационный отжиг, то значения коэффициентов вытяжки на всех операциях можно принять одинаковыми. Если же термическую обработку не проводят, то на первых операциях должны быть приняты большие (на 3—5 %) значения K. При этом более эффективно используются пластические свойства материала и требуется меньшее число операций для получения детали.

Значение предельного коэффициента вытяжки в значительной мере зависит от анизотропии листового материала. В основном это влияние определяется минимальным значением коэффициента анизотропии r_{min} в плоскости листа.

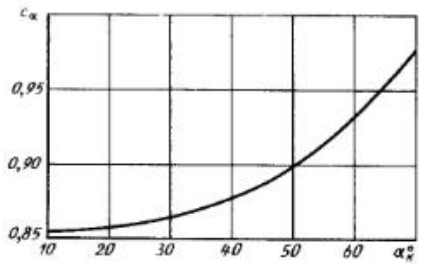


Рис. 15. Зависимость коэффициента c_α от угла конусности матрицы $\alpha_к$

На рис. 12 показаны теоретические значения $K_п$ при вытяжке заготовок с относительной толщиной $[s(0)/D_з] \times 100 = 2$ на торондальных матрицах в зависимости от r_{min}. С ростом значения r_{min} коэффициент вытяжки увеличивается независимо от величины $\bar{r}_м$. На второй и последующих операциях значения предельного коэффициента вытяжки $K_п$ меньше, чем на первой операции. Это связано с наличием дополнительных изгибающих напряжений на участке свободного изгиба и спрямления стенок полуфабриката. На рис. 12 штриховой линией показано изменение предельного коэффициента вытяжки при $\bar{r}_м = 5$ на первой операции, который примерно на 25 % больше значений $K_п$ на второй операции при том же $\bar{r}_м$.

Вытяжку в конусно-торондальных матрицах можно вести с большими значениями $K_п$. На рис. 13 показана зависимость $K_п = f(r_{min})$ при вытяжке на конусно-торондальных матрицах с различными углами конусности. Штриховая линия характеризует $K_п$ при вытяжке на матрицах с торондальной кромкой. На рис. 14 приведены значения предельного коэффициента вытяжки $K_п$, которые могут быть определены с учетом параметра Ω, найденного по формулам (9) и (10), а также с помощью графиков (см. рис. 7). В случае вытяжки на конусно-торондальных матрицах предельное значение

$$K_{п.к} = K_{п.т} c_\alpha, \qquad (19)$$

где c_α определяют с помощью графика (рис. 15).

3. РАСЧЕТ ЧИСЛА ОПЕРАЦИЙ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГОТОВКИ И ИНСТРУМЕНТА

По найденным значениям предельных коэффициентов вытяжки определяют необходимое для получения готовой детали число операций:

$$n = 1 + [\ln(D_з/K_1) - \ln d_n]/K_{ср}, \qquad (20)$$

где K_1 и $K_{ср}$ — коэффициенты вытяжки соответственно на первой операции и средний.

Число операций при последовательной вытяжке в ленте определяют исходя из расчетного диаметра заготовки D и принятых значений коэффициентов вытяжки в соответствии с методикой расчета для обычной вытяжки.

5. Число операций вытяжки, выполняемых без отжига

Материал	Число операций	Материал	Число операций
Сталь: 08, 10, 15	3—4	Алюминий	4—5
12Х12Н9Т	1—2	Медь	1—2
		Магниевые сплавы	1

В табл. 5 приведены ориентировочные данные о числе операций вытяжки для различных материалов без их предварительной термической обработки.

По установленному значению K можно рассчитать промежуточные размеры заготовок и их высоту.

Примеры разбиения детали на элементарные участки при расчете площади поверхности детали показаны на рис. 16 и 17. Методика расчета площади поверхности детали дана в гл. 4.

При последовательной вытяжке в ленте без надрезки диаметр плоской заготовки рассчитывают как для обычной вытяжки, но диаметр заготовки в этом случае принимают на 10 % больше расчетного, что позволяет произ-

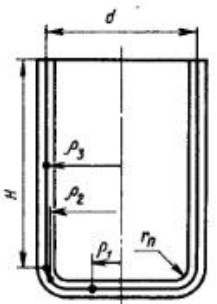


Рис. 16. Схема к определению площади поверхности деталей простой формы (ρ_i — координата центра тяжести отрезка срединной линии)

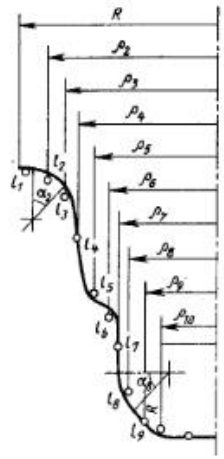


Рис. 17. Схема к определению площади поверхности детали сложной формы (l_i — длина отрезка срединной линии; α_i — угол дуги)

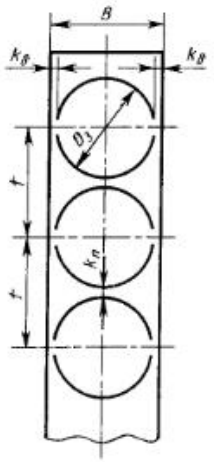


Рис. 18. Схема к определению размеров перемычек и ширины ленты

вести на первой операции вытяжки набор избыточного количества материала, необходимого для повышения надежности процесса.

Исходным параметром для определения ширины ленты является расчетный диаметр заготовки. Ширину ленты принимают равной $B = 1{,}2D_з$, где $D_з$ — диаметр заготовки с учетом диаметрального припуска на обрезку, значения которого приведены в табл. 6.

Шаг подачи ленты из конструктивных соображений выбирают равным $t = 0{,}8D_з$. Размеры перемычек (рис. 18) между деталями $k_п$ и боковых перемычек $k_б$ приведены в табл. 7.

При вытяжке круглых заготовок, полученных из листовых материалов с плоскостной анизотропией механических свойств, по краю полуфабриката образуются фестоны, высота которых может достигать 10—15 % общей высоты полуфабриката. Перед дальнейшей обработкой полуфабриката фестоны необходимо удалить, что приводит к излишнему расходу материала и увеличению трудозатрат.

Экономию материала достигают при использовании не круглой, а профильной заготовки (рис. 19). В этом случае ослабляется влияние анизотропия, а расход материала на обрезку существенно снижается. Контур профильной заготовки (см. рис. 20) изменяется по косинусондальному закону:

$$D_к = 2R_к = (D_з + D_к)/2 + (D_з - D_к)\cos 4\varphi/2, \quad (21)$$

6. Припуск диаметра заготовки на обрезку (размеры, мм)

Диаметр заготовки $D_з$	Припуск при толщине ленты										
	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
До 10	1,2	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	—	—	—	—	—
10—30	1,2	1,2	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	3,0	—	—	—
30—40	1,2	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,5	4	5
Св. 40	—	—	2,0	2,2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5	6

7. Ширина перемычек при последовательной вытяжке в ленте (размеры, мм)

Диаметр заготовки $D_з$	Ширина перемычки между деталями $k_п$	Ширина боковых перемычек $k_б$	
		в целой ленте	в ленте с надрезами или вырезами
До 10	1,0—1,5	1,0—1,5	1,5—2,0
10—30	1,5—2,0	1,5—2,0	2,0—2,5
Св. 30	2,0—2,5	2,0—2,5	2,5—3,0

где $D_к = 2R_к$ — минимальный диаметр профильной заготовки в направлении образования фестонов; φ — угол, определяющий точки контура. Значение $D_к$ находят по графику на рис. 20. При определении контура профильной заготовки (достаточно построить $^1/_8$ его часть) следует последовательно определить текущее значение $D_к = 2R_к$, задаваясь $\varphi = 0$; 5; 10; 15; 20 и 22,5°. Полученный таким образом ряд точек представляет собой контур $^1/_8$ части профильной заготовки, максимальный диаметр которой должен быть расположен в направлении, совпадающем с направлением r_{min}.

Величину $D_к = 2R_к$ можно установить экспериментально, для чего на детали, полученной из круглой заготовки, следует замерить высоту фестонов. Тогда

$$D_к = 2R_к = 2\sqrt{D_з^2/2 - 2R_м\Delta h}, \quad (22)$$

где Δh — высота фестонов; $\Delta h = h_1 + h_2$ (см. рис. 7, гл. 4).

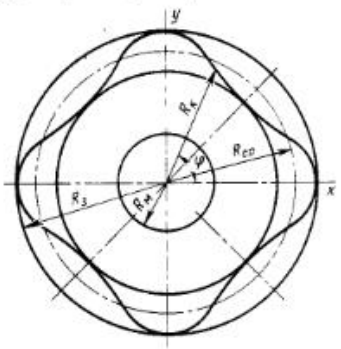


Рис. 19. Профильная заготовка для многооперационной вытяжки

Из построения профильной заготовки видно, что наибольший коэффициент использования материала будет при $r_{max} = r_0$ и $r_{max} = r_{90}$. Это означает, что минимальный размер профильной заготовки располагается вдоль или поперек проката. Таким образом, за счет изменения формы заготовки выявляется возможность уменьшить ширину полосы и шаг подачи, т. е. повысить коэффициент использования материала. На рис. 21, *а* показаны зависимости $\Delta\eta = f(\lambda_r)$ при различных коэффициентах вытяжки для одно-, двух- и трехрядного раскроя. Здесь $\Delta\eta$ — приращение коэффициента использования материала по сравнению с круглой заготовкой, а

$$\lambda_r = (r_{max} - r_{min})/r_{ср}, \quad (23)$$

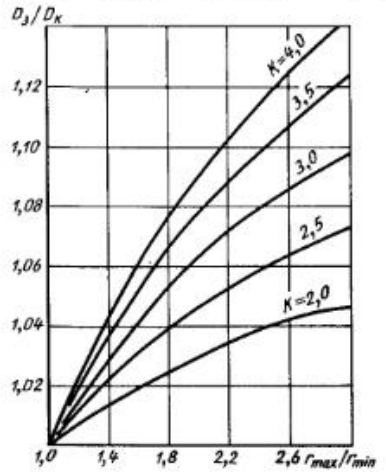


Рис. 20. График зависимости $D_з/D_к = f(r_{max}/r_{min})$

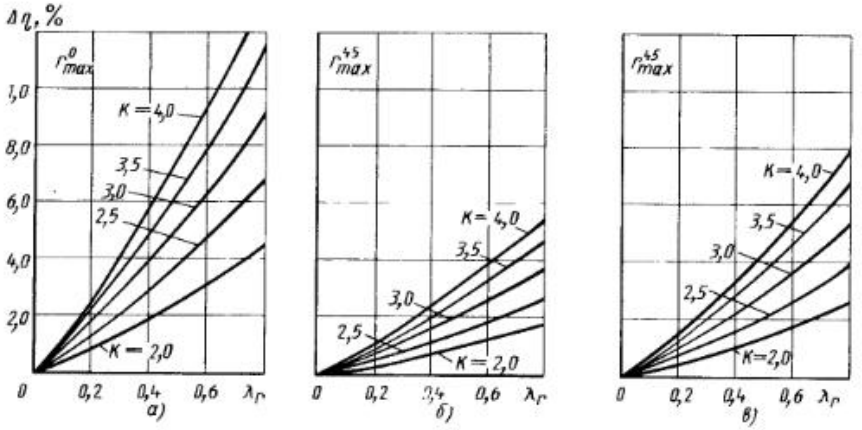


Рис. 21. Графики для определения Δη раскроя:
а — r^{0}_{max} — 1-рядный раскрой; *б* — r^{45}_{max} — 2-рядный раскрой; *в* — r^{45}_{max} — 3-рядный раскрой

где λ_r — степень плоскостной анизотропии.

Графики на рис. 21, *б* и *в* показывают зависимость $\Delta\eta = f(\lambda_r)$ для двух- и трехрядного шахматных раскроев профильной заготовки, минимальный размер которой расположен под углом 45° к направлению проката. При однорядном расположении заготовки выигрыша в экономии материала не будет.

При многооперационной вытяжке цилиндрических деталей с фланцем припуски на подрезку фланца устанавливают в зависимости от толщины материала и диаметра фланца. Припуск на подрезку фланца определяют по формуле

$$c = abs\,(0), \qquad (24)$$

где *a* и *b* — коэффициенты, зависящие от толщины *s* (0) материала и диаметра $D_ф$ фланца.

s (0), мм	0,1—0,3	0,3—0,6	0,6—0,9	0,9—1,4	1,4—2,0	2,0—3,0
a	10	6	4	3	2,5	2

$D_ф$, мм	до 30	30—50	50—100	100—250
b	1,0	1,3	1,8	2,5

Приведенные выше формулы для определения размеров плоской заготовки не учтывают характера течения материала и, в частности, его утонения, в результате чего происходит увеличение поверхности заготовки. Л. А. Шофманом предложена формула для оценки действительной площади вытянутого цилиндрического стакана:

$$F_0/F_1 = \delta_{ср} = 1\Big/\left[0{,}95 + \frac{K^2 0{,}8\mu s(0)}{r_м}\right]. \qquad (25)$$

С учетом первоначальной толщины заготовки $F_0 = F_1\delta_{ср}$. Зависимость величины $\delta_{ср}$ от коэффициента вытяжки и относительного радиуса матрицы приведена на графике (рис. 22).

Высота цилиндрических полуфабрикатов на последующих операциях:
для полуфабрикатов без фланца

$$H_n = r_n + l_n, \qquad (26)$$

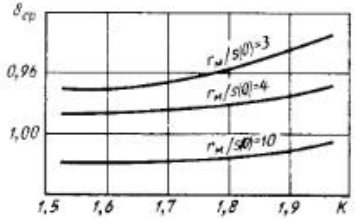


Рис. 22. График зависимости $\delta_{ср} = F_0/F_1 = f(K)$ при μ—0,05÷0,2

где r_n — радиус оболочки в месте перехода от дна к стенке; l_n — высота цилиндрической части оболочки;
для полуфабрикатов с фланцем

$$H = H_{n-1}K_n - 0{,}86r_{n-1}K_n + 0{,}86r_n. \qquad (27)$$

Высота полуфабрикатов, получаемых на операциях вытяжки, может быть подсчитана с учетом анизотропии материала по формуле

$$H_в = \frac{s(0)\{D_з^2 + 4\{(R_c - r_c)]R_c - \\ - r_c + \pi[r_c + s(0)/2]\}\}}{4\Big\{s(0)[2R_c + s(0)] + [s_{max} - \\ - s(0)]\Big[R_c + s(0) - \\ - \frac{s_{max} - s(0)}{3}\Big]\Big\}}, \qquad (28)$$

где $H_в$ — высота вытяжки по впадине, образованной двумя смежными фестонами; r_c—радиус сопряжения стенки и дна; R_c—расстояние между центрами радиусов r_c.

Вытяжку оболочки без прижима осуществляют обычно в матрицах с конусно-тороидальной рабочей полостью. Устойчивость конической части протягиваемой оболочки, опирающейся на коническую поверхность матрицы, больше, чем при работе на тороидальной матрице, когда такого контакта нет. Возможность образования складок в таких матрицах меньше, чем при вытяжке в тороидальных матрицах. Матрицы с тороидальным профилем применяют при $K < 1{,}25$, а с конусно-тороидальным при $K > 1{,}25$. Основным рабочим

8. Радиусы закругления вытяжных матриц $r_м$ (размеры, мм)

Материал	*s* (0) ⩽ 3	*s* (0) > 3
Сталь: листовая углеродистая	(6÷10) *s* (0)	(4÷6) *s* (0)
коррозионностойкая и жаропрочная	(8÷10) *s* (0)	(6÷8) *s* (0)
Латунь, медь	(5÷8) *s* (0)	(3÷5) *s* (0)
Алюминий	(4÷7) *s* (0)	(3÷5) *s* (0)
Примечание. Бо́льшие значения $r_м$ берут для первой операции и при тонком материале.		

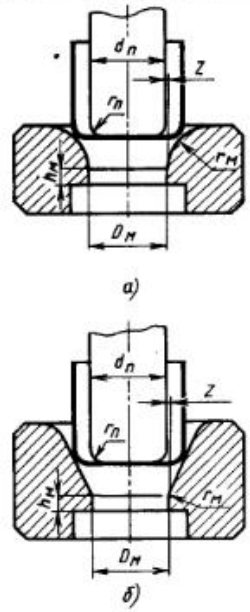


Рис. 23. Форма матриц и пуансонов:
а — тороидальная матрица; *б* — конусно-тороидальная матрица

элементом вытяжной тороидальной матрицы является ее радиус закругления. Величина радиальной кривизны тороидального участка матрицы оказывает существенное влияние на максимальное растягивающее напряжение, коэффициент вытяжки, устойчивость и сокращение толщины стенки в опасном сечении.

С увеличением радиуса матрицы улучшаются условия вытяжки в результате снижения сопротивления изгибу и уменьшения ширины перетягиваемого фланца. Это позволяет интенсифицировать процесс вытяжки, используя большие значения коэффициентов вытяжки. С другой стороны, увеличение радиуса матрицы приводит к увеличению возможности складкообразования.

$[s(0)/D_з]\,100$ . .	2,0—1,0	1,0—0,2	0,2—0,06
$r_м$	(10÷15) s	(15÷20) s	(20÷30) s

$[s(0)/D_з]\,100$ ...	св. 2	2,0—1,0	1,0—0,5
$r_{м_n}$ ...	(0,6÷0,7) $r_{м_{n-1}}$	(0,65÷0,7) $r_{м_{n-1}}$	(0,7÷0,8) $r_{м_{n-1}}$

В табл. 8 приведены радиусы закругления вытяжных матриц (рис. 23) в зависимости от материала детали.

На последующих операциях вытяжки радиусы закругления матрицы принимают

$$r_{м_n} = (0{,}7 \div 0{,}9)\, r_{м_{n-1}}, \qquad (29)$$

где $r_{м_{n-1}}$ — радиус матрицы на предыдущей операции.

Радиус закругления пуансона на последующих операциях

$$r_{п_n} = 0{,}5\,(d_{п_{n-1}} - d_{п_n}). \qquad (30)$$

На последней операции вытяжки $r_п$ принимают равным заданному радиусу готовой детали, но не менее (3÷2) s (0) для материалов толщиной s (0) < 6 мм и не менее (2÷1,5) s (0) для s (0) > > 6 мм.

Рекомендуемая высота рабочего пояска матрицы (мм) зависит от диаметра (мм) детали:

Диаметр	до 20	20—25	св. 50
Высота пояска	0,4	0,3	0,2

При вытяжке оболочек с широким фланцем применяют прижимное устройство. В этом случае радиусы закругленной матрицы могут быть приняты бóльшими, чем при вытяжке деталей без фланца:

В случае последовательной вытяжки в ленте радиусы закруглений матрицы принимают меньшими, чем при однооперационной вытяжке:

Радиусы закруглений матрицы должны постепенно уменьшаться по переходам. Радиус закругления пуансона при вытяжке деталей средних размеров принимают равным, а при вытяжке мелких деталей — большим радиуса закругления матрицы.

По диаметрам вытяжек на операциях и выбранным радиусам закруглений определяют глубину вытяжки:

для n-й вытяжки

$$H_n = (D_з^2 - D_ф^2)/4d_п + 0{,}86r_n. \qquad (31)$$

4. РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

На величину максимального напряжения $\sigma_{\rho\,max}$ в сечении цилиндрической стенки и усилие вытяжки влияют следующие параметры: геометрия инструмента и качество обработки его поверхности, зазор между пуансоном и матрицей, характеристики штампуемого материала. Наиболее существенным является влияние кривизны тороидального участка рабочей поверхности тороидальной и угла конусности коническо-торондальной матриц. Максимальное усилие вытяжки для второй и последующих операций

$$P_{max} = \pi\, ds\,(0)\, \sigma_{\rho\,max} n, \qquad (32)$$

где n — поправочный коэффициент, зависящий от значений коэффициента вытяжки K;

K . . .	1,43	1,39	1,33	1,30	1,25	1,28	1,11	1,06
n . . .	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80	0,70	0,60	0,50

При определении усилия значения $\sigma_{\rho\,max}$ определяют по формулам (1) и (5), а с учетом анизотропии материала по формулам (7) и (10).

Если последующую вытяжку осуществляют с прижимом, то необходимо знать усилие прижима, соответствующее $\sigma_{\rho\,max}$. Усилие прижима на последующих операциях подсчитывают по формуле

$$Q = p_{пр} F_з = p_{пр} \frac{\pi}{4} \left[d_{n-1}^2 - (d_n - 2r_{м_n})^2\right], \qquad (33)$$

где $p_{пр}$ — давление прижима; $F_з$ — площадь заготовки под прижимом; d_{n-1} и d_n — диаметры вытяжки соответственно на предыдущей и последующей операциях; $r_{м_n}$ — радиус сопряжения дна и стенки при вытяжке на последующей операции.

Ниже приведены значения $p_{пр}$ для различных материалов.

	$p_{пр}$, МПа
Алюминий	0,8—1,2
Латунь	1,5—2,0
Медь	1,0—1,5
Сталь мягкая, толщиной:	
св. 1,5	1,5—2,5
до 0,5	2,0—3,0
Аустенитные стали . .	2,5—3,0

Полное усилие вытяжки для прессов простого действия

$$P_\Sigma = P_{max} + Q; \qquad (34)$$

для прессов двойного действия $P = P_в$.

Если в конструкции вытяжного штампа предусмотрены буферные устройства и выталкиватели, то усилие буферного устройства при многооперационной вытяжке с прижимом на прессах простого действия будет равно

$$Q = \frac{p_{пр}\pi d_{n-1}^2 [1 - 1/K^2]}{4 \sin\alpha_к} (\mu \cos\alpha_к + \sin\alpha_к). \qquad (35)$$

Работу формоизменения при вытяжке характеризует площадь диаграммы усилие — путь. Обычно величину работы (Дж), затрачиваемой на последующих операциях вытяжки, определяют по формуле

$$A_n = CP_{n\,max} H_n, \qquad (36)$$

где A_n — работа на последующей операции вытяжки; H_n — глубина вытяжки; $P_{n\,max}$ — максимальное усилие вытяжки на каждой операции; C — коэффициент полноты диаграммы усилие — путь на последующих переходах, зависящий от коэффициента вытяжки:

K . . .	1,42	1,33	1,25	1,11
C . . .	0,85	0,80	0,75	0,70

При наличии буферных устройств и выталкивателей

$$A = A_n + A_б \leqslant A_{пр}, \qquad (37)$$

где $A_б$ — работа, затрачиваемая на сжатие буфера; $A_{пр}$ — работа пресса за один рабочий ход.

Под скоростью вытяжки обычно понимают скорость перемещения инструмента в начале вытяжки. Для кривошипных прессов

$$v = 0{,}105 n' \sqrt{h\,(H_{пр} - h_{пр})}, \qquad (38)$$

где $H_{пр}$ — ход пресса; $h_{пр}$ — рабочая часть хода; n' — число ходов в секунду.

Рекомендуемые скорости вытяжки для различных материалов приведены в табл. 9.

Полезная мощность при вытяжке

$$N = An'. \qquad (39)$$

Мощность на маховике

$$N_м = K'An/\eta, \qquad (40)$$

где $K' = 1{,}2 \div 1{,}4$ — коэффициент неравномерности процесса; $\eta = 0{,}6 \div 0{,}8$ — КПД пресса.

9. Скорость вытяжки (мм/с) в начале процесса

Материал	Пресс действия	
	простого	двойного
Алюминий	875	500
Алюминиевые сплавы	150—200	—
Латунь	1000	500
Медь	750	430
Сталь:		
низкоуглеродистая	275	175—200
коррозионностойкая	—	100—150

Мощность электродвигателя

$$N_{дв} = N_м/\eta_1, \qquad (41)$$

где η_1 — КПД передачи.

Для снижения $\sigma_{p\,max}$ и усилия вытяжки за счет уменьшения трения между материалом и инструментом и повышения стойкости штампов в процессе вытяжки используют смазочные материалы. Их необходимые свойства: хорошо удерживаться на поверхности инструмента и заготовки; выдерживать значительные давления; легко удаляться с поверхности готовой детали; не вызывать коррозии металла и инструмента; быть дешевыми. Различают смазочные материалы с наполнителем и без наполнителя. Наиболее предпочтительны смазочные материалы с наполнителем (мелом, тальком, графитом), позволяющие снизить коэффициент трения в 2—3 раза. При вытяжке без смазочных материалов стали и алюминиевых сплавов коэффициент трения $\mu = 0{,}20 \div 0{,}35$. Смазочный материал с наполнителем, например минеральное масло с мелом и графитом, обеспечивает $\mu = 0{,}08 \div 0{,}15$, а использование в качестве смазочного материала веретенного масла или плеики ПХВ позволяет снизить коэффициент трения соответственно до 0,10—0,15 и 0,05—0,075.

В табл. 10 приведены составы смазочных материалов на основе веретенного масла, применяемого при вытяжке.

В случае легкой вытяжки можно рекомендовать в качестве смазочного материала 20 %-ный раствор зеленого мыла в воде, водную эмульсию, содержащую по 3 % зеленого мыла и талька, и эмульсию стандартного эмульсола. При средней вытяжке рекомендуется смазочный материал состава, %: 25 растительного масла, 5 натрового мыла, 45 мела и 25 воды, а для тяжелой вытяжки — эмульсионный смазочный материал «Укринол-5/5». Для вытяжки труднодеформируемых сталей и сплавов применяют лаки марок: ХВ-5179, А-113 и АК-113Ф.

5. ТОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКОЙ

Получаемая в результате многооперационной вытяжки точность оболочек определяется допусками на их диаметр и высоту. Отклонение размеров

10. Составы смазочных материалов для вытяжки

Сталь	Содержание, %					
	Веретенное масло	Олеиновая кислота	Рыбий жир	Солидол	Вода	Наполнитель
Низкоуглеродистая	43	8	8	—	15	6 зеленого мыла, 15 графита, 5 серы
Углеродистая и низколегированная	40	—	—	40	—	20 графита

11. Значения коэффициента n

Общее число операций вытяжки	Порядковый номер операции	Начальная толщина стенки s (0), мм		
		0,5—2	2—4	4—6
3	2	0,30	0,25	0,20
	3	0,1/0	0,1/0	0,1/0
4	2	0,50	0,40	0,35
	3	0,30	0,25	0,20
	4	0,1/0	0,1/0	0,1/0
5	2	0,50	0,40	0,35
	3	0,40	0,30	0,25
	4	0,30	0,25	0,20
	5	0,1/0	0,1/0	0,1/0

Примечание. Числитель соответствует вытяжке с допусками деталей по 14—16 квалитету, а знаменатель по 11—12 квалитету. Остальные значения относятся к вытяжке с допусками деталей как по 14—16, так и по 11—12 квалитету.

по диаметру зависит от величины зазора между пуансоном и матрицей и точности изготовления штампа.

Зазор между цилиндрическими поверхностями пуансона и матрицы назначается больше исходной толщины материала заготовки:

$$z = (D_м - d_п)/2 > s\,(0), \qquad (42)$$

где z — односторонний зазор между цилиндрическими поверхностями пуансона и матрицы.

При вытяжке с прижимом

$$z = ns\,(0) + s'\,(0), \qquad (43)$$

где n — коэффициент (табл. 11); $s\,(0)'$ — максимальная толщина заготовки с учетом верхнего (плюсового) отклонения.

Для определения одностороннего зазора можно рекомендовать формулы, приведенные в табл. 12.

Для всех операций, кроме последней, направление зазора безразлично. На последней операции при вытяжке цилиндрических деталей зазор устанавливается:

с заданным наружным размером за счет пуансона, т. е.

$$D_м = d; \quad d_п = D_м - 2z; \qquad (44)$$

с заданным внутренним размером за счет матрицы, т. е.

$$d_п = d_{вн}; \quad D_м = d_п + 2z. \qquad (45)$$

Исполнительные размеры рабочих частей пуансонов и матриц назначают в зависимости от того, как сопрягается в процессе сборки вытягиваемая деталь: по наружному или внутреннему

12. Формулы для определения одностороннего зазора при вытяжке деталей с точностью изготовления по 11—12 и 14—16 квалитетам

Операции (переход) вытяжки	Квалитет	
	11—12	14—16
Вторая и последующие	$z = s\,(0) + \delta' + 2a'$	$z = s\,(0) + \delta' + (2{,}5 \div 3{,}0)a'$
Последняя	$z = s\,(0) + \delta'$	$z = s\,(0) + \delta' + 2a'$

Примечание: δ' — верхнее (плюсовое) отклонение допуска на толщину материала, мм; a' — прибавка (табл. 13).

13. Значения прибавки a' (размеры, мм)

Толщина материала s (0)	Прибавка a'	Толщина материала s (0)	Прибавка a'
0,2	0,05	1,8	0,21
0,5	0,10	2,0	0,22
0,8	0,12	2,5	0,25
1,0	0,15	3,0	0,30
1,2	0,17	4,0	0,35

коитуру. Если сопряжение детали осуществляется по наружному контуру, то

$$D_м = (D_н - \Delta)^{+\delta_м}; \quad (46)$$

$$d_п = (D_м - \Delta - 2z)_{-\delta_п}; \quad (47)$$

если по виутреннему, то

$$D_м = (D_н + 0{,}5\Delta + 2z)^{+\delta_м}; \quad (48)$$

$$d_п = (D_н + 0{,}5\Delta)_{-\delta_п}, \quad (49)$$

где $d_п$ и $D_м$ — исполнительные размеры соответственно пуансона и матрицы; $D_н$ — номинальный диаметр по наружному и внутреннему контурам; Δ — допуск на изготовление детали; z — односторонний зазор; $\delta_п$ и $\delta_м$ — допуски на изготовление пуансона и матрицы; $\delta_п = (0{,}08 \div 0{,}12)\,\Delta$ и $\delta_м = (0{,}12 \div 0{,}16)\,\Delta$, но не выше допусков по 8—9 квалитету на соответствующий размер.

Допускаемые отклонения по внутреннему диаметру вытянутых деталей приведены в табл. 14. Точность осесимметричной вытяжки по высоте иллюстрирует табл. 15.

14. Допускаемые отклонения по внутреннему диаметру вытянутых деталей (размеры, мм)

Толщина материала s (0)	Номинальный внутренний диаметр $d_{вн}$			Толщина материала s (0)	Номинальный внутренний диаметр $d_{вн}$		
	До 50	50—100	100—300		До 50	50—100	100—300
0,5	±0,12	—	—	2	±0,40	±0,50	±0,70
0,6	±0,15	±0,20	—	2,5	±0,45	±0,60	±0,80
0,8	±0,20	±0,25	±0,30	3,0	±0,50	±0,70	±0,90
1,0	±0,25	±0,30	±0,40	4,0	±0,60	±0,80	±1,00
1,2	±0,30	±0,35	±0,50	5,0	±0,70	±0,90	±1,10
1,5	±0,35	±0,40	±0,60	6,0	±0,80	±1,00	±1,20

15. Допускаемые отклонения по высоте вытянутых деталей (размеры, мм)

Толщина материала s (0)	Высота вытягиваемой детали						
	До 18	18—30	30—50	50—80	80—120	120—180	180—260
До 1,0	±0,5	±0,6	±0,8	±1,0	±1,2	±1,5	±1,8
1,0—2,0	±0,6	±0,8	±1,0	±1,2	±1,5	±1,8	±2,0
2,0—4,0	±0,8	±1,0	±1,2	±1,5	±1,8	±2,0	±2,5
4,0—6,0	±1,0	±1,2	±1,5	±1,8	±2,0	±2,5	±3,0

Глава 6 ВЫТЯЖКА ДЕТАЛЕЙ КОРОБЧАТОЙ ФОРМЫ

Схемы формоизменения заготовки при вытяжке деталей коробчатой и осесимметричной формы во многом сходны. Однако схема напряжеино-деформированного состояния заготовки в процессе вытяжки коробчатых деталей (рис. 1, 2) неоднородна как по координате ρ, так и по координате θ. При $\rho = r$ в области фланца, предназначенной для угловых участков стеики коробчатой детали, возникают следующие напряжения:

$$\sigma_{\rho\,max} = \sigma_s\,[\ln(R/r) - \theta^2]/(\sqrt{3}\,\gamma) + \mu Q/(\pi R s);$$

$$\tau_{\rho\theta} = \sigma_s\theta/(\sqrt{3}\,\gamma);$$

$$\sigma_\theta = -\,[2\sigma_s\sqrt{1 - (\theta/\gamma)^2}/\sqrt{3} - \sigma_{\rho\,max}],$$

где σ_ρ, σ_θ, $\tau_{\rho\theta}$ — компоненты тензора напряжения; σ_s — напряжение текучести; R — расстояние от центра углового закругления до края заготовки по биссектрисе угла; s — толщина стеики детали; γ — угол, определяющий протяженность очага пластической деформации (экспериментально показано, что γ можно принимать равным 1 рад).

Пластические деформации распространяются в части фланца заготовки, предназначенной для образования плоских стенок детали (см. рис. 1, табл. 1). Значения этих деформаций прежде всего зависят от отношения высоты h коробчатой детали к ее ширине B, от радиуса r скругления в углах сопряжения плоских стенок. В сечениях фланца, перпендикулярных к контуру проема матрицы, возникают сжимающие напряжения σ_θ, под действием которых образовавшаяся плоская стенка может потерять устойчивость и собраться в гофры. При разработке процесса вытяжки для снижения в указанном месте напряжеий σ_θ увеличивают напряжения σ_ρ, повышая силу прижима флаица илн вводя перетяжные ребра (пороги).

При вытяжке коробчатых деталей оценка предельно допустимой деформацни на первой операции существенно осложняется ввиду неоднородиого распределения деформаций и напряжеиий по периметру проема матрицы. Для практических расчетов обычно используют условный коэффициент вытяжки, который по аналогии с коэффициеитом вытяжки цилиндрического стакана определяют по выражению

$$K = R/r = \sqrt{1 + 2h/r},$$

где r — радиус скругления в сопряжениях плоских стенок коробчатой детали; h — высота детали; R — расстояние от центра углового скругления до края заготовки по биссектрисе угла.

При вытяжке коробчатых деталей максимальные растягивающие напряжения σ_ρ в части фланца на угловых скруглениях распределены неравиомерно. Эпюра распределения напряжений приведена на рис. 2.

Ввиду неравиомерного распределения максимальных растягивающих напряжений σ_ρ на угловых закруглениях значения коэффициента вытяжки для коробчатых деталей прииимают в 1,5—2 раза больше, чем при вытяжке цилиндрических деталей (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что наибольшая отиосительная высота прямоугольиых деталей зависит от отношения r/B и отиошения толщиы s (0) заготовки к условному диаметру заготовки $D_з = 2R$. В табл. 3 приведены отиосительные высоты коробчатых деталей, вытягиваемых за одну операцию из сталей марок 08 и 10.

На рис. 3 показана диаграмма выбора способа построеиия коитура.

При вытяжке иизких коробчатых деталей с относительио малыми ра-

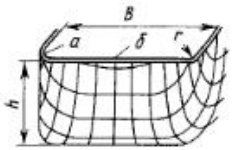


Рис. 1. Искажение координатной сетки на плоских стенках коробчатой детали после вытяжки (точки *а* и *б* характеризуются наибольшими деформациями)

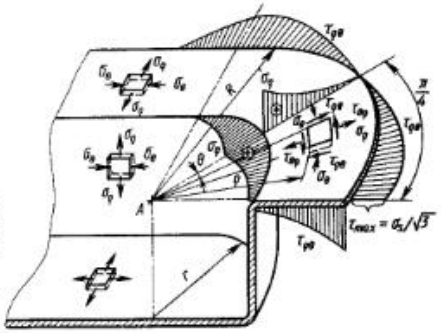


Рис. 2. Распределение напряжений в части фланца на угловых скруглениях при вытяжке коробчатой детали

диусами закруглений (см. рис. 3, область *IIа*) течение материала происходит только в местах сопряжений плоских стенок заготовки, прямолинейные участки стенок отгибаются. Контур заготовки определяют геометрической разверткой детали на плоскость основания. При этом ступень, образующуюся при развертке (рис. 4, *а*), скругляют плавным контуром так, чтобы площадь, описываемая плавным контуром, оставалась неизменной. Расчет размеров заготовки проводят по методике Б. П. Зворонно, изложенной ниже.

1. Деформация (логарифмическая) при вытяжке по краю детали, %

Относительная высота коробки h/B	Деталь коробчатой формы		Цилиндрическая деталь
	в середине стенки	по биссектрисе угла	
1,0	23,1—26,2	37,0—40,4	43,8
0,5	13,8—18,5	28,4—32,4	37,0
0,3	5—8	22,2—26,2	27,7

2. Приближенные значения предельного коэффициента вытяжки $K_п$ коробчатых деталей (см. рис. 4) для низкоуглеродистой стали

Относительный радиус r/B	Первая вытяжка						Последующие операции вытяжки		
	Квадратная деталь			Прямоугольная деталь					
	Относительная толщина заготовки $[s(0)/D_з]100$								
	0,1—0,3	0,3—1,0	1,0—2,0	0,1—0,3	0,3—1,0	1,0—2,0	0,1—0,3	0,3—1,0	1,0—2,0
0,40	2,08	2,22	2,38	2,27	2,38	2,50	1,37	1,43	1,49
0,30	2,38	2,50	2,63	2,50	2,63	2,77	1,51	1,58	1,66
0,20	2,63	2,77	2,96	2,77	2,96	3,03	1,66	1,75	1,85
0,10	3,03	3,12	3,33	3,03	3,12	3,33	1,88	1,96	2,08
0,05	3,12	3,33	3,35	3,33	3,33	3,35	3,35	2,08	2,22

3. Относительная высота коробчатой детали (см. рис. 4), штампуемой за один переход

Относительный радиус r/B	Относительная толщина заготовки $[s(0)/D_з]100$			
	2,0—1,5	1,5—1,0	1,0—0,5	0,5—0,2
0,30	1,2—1,0	1,1—0,95	1,0—0,9	0,9—0,85
0,20	1,0—0,9	0,9—0,82	0,85—0,7	0,8—0,7
0,15	0,9—0,75	0,8—0,7	0,75—0,65	0,7—0,6
0,10	0,8—0,6	0,7—0,55	0,65—0,5	0,5—0,45
0,05	0,7—0,5	0,6—0,45	0,55—0,4	0,5—0,35
0,02	0,5—0,4	0,45—0,35	0,4—0,3	0,35—0,25

Размер отгибаемой части заготовки с учетом радиуса скругления у дна коробки $r_д$

$$l = h + 1{,}57r_д$$

Радиус скругления углов заготовки

$$R = \sqrt{r^2 + 2rh - 0{,}86r_д\,(r + 0{,}16r_д)}.$$

Откуда при $r = r_д$ $R = \sqrt{2rh}$.

Вычерчивают контур заготовки, после чего отрезки ab (см. рис. 4, *а*) делят пополам и через полученные точки проводят касательные к окружности радиуса R. На рис. 4 показаны различные формы контура заготовки. Способы построения их приведены на рис. 4, *б*.

При построении контура заготовки для вытяжки низких коробчатых деталей с относительно большими радиусами сопряжения плоских стенок (см. рис. 3, область *IIб*) радиус контура заготовки на угловых скруглениях определяют с помощью табл. 4 или расчетом с учетом перетекания металла в плоские стенки:

$$R_1 = xR,$$

где $R = \sqrt{r^2 + 2rh - 0{,}86r_д\,(r + 0{,}16r_д)}$;

$$x = 0{,}074\,(R/2r)^2 + 0{,}982.$$

Ширина h_a и h_b полоски, отрезаемой от геометрической развертки прямых сторон заготовки (рис. 5), с учетом последующего перемещения металла при формировании поверхностей сопряжения плоских стенок составляет

$$h_a = yR^2/(A - 2r),\ h_b = yR^2/(B - 2r).$$

Значения коэффициентов x и y приведены в табл. 4. По полученным значениям ширины, длины и углового радиуса развертки строят плавный контур с радиусами скругления R_a и R_b.

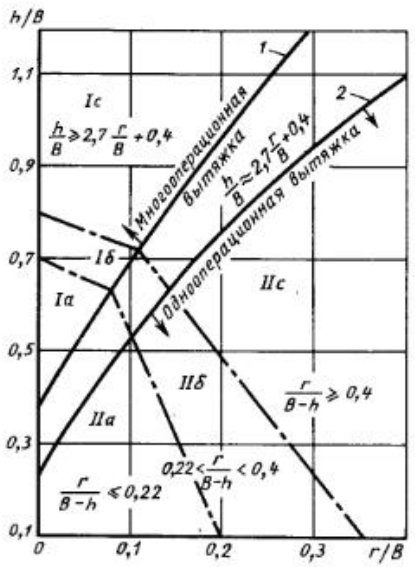


Рис. 3. Диаграмма для выбора способа построения контура заготовки при вытяжке коробчатых деталей

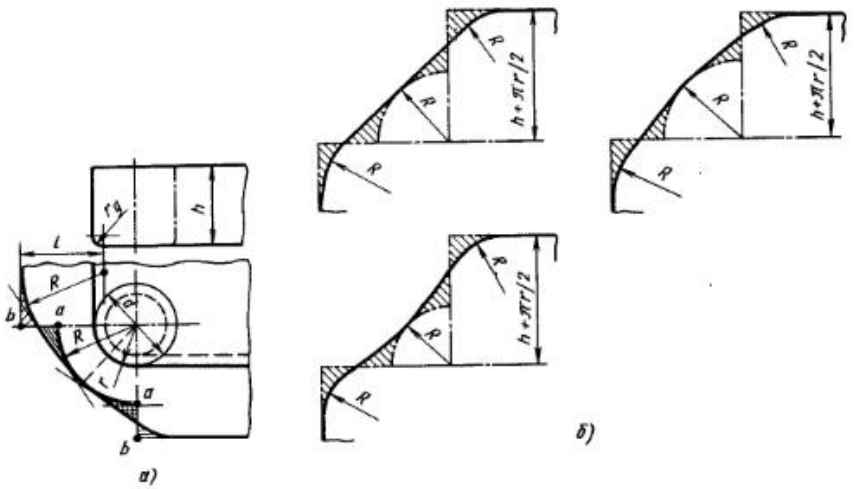


Рис. 4. Построение контура заготовки:
а — пример построения; *б* — возможные варианты оформления скруглений в углах заготовки

Рассмотренное построение контура применимо для коробчатых деталей с отношением сторон $A/B = 1{,}5 \div 2{,}0$.

Если в технологическом процессе предусмотрена обрезка фланца, то при построении контура необходимо учесть припуск на обрезку. Контур заготовки при этом можно упростить.

При вытяжке высоких коробчатых деталей (см. рис. 3, область *II*) контур заготовки близок к окружности или овалу (рис. 6). Для коробчатых деталей, имеющих в плане форму квадрата, диаметр $D_з$ заготовки определяют по формуле

$$D_з = 1{,}13\sqrt{B^2 + 4B(h - 0{,}43r_д) - 1{,}72r_д(h + 0{,}5r) - 4r_д(0{,}11r_д - 0{,}18r)};$$

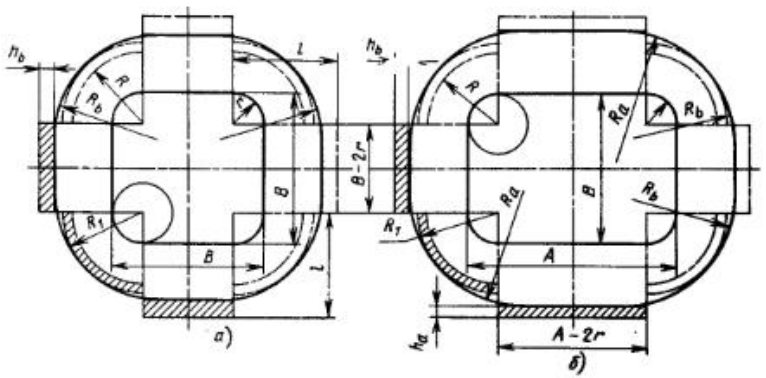


Рис. 5. Контур заготовки для вытяжки невысоких деталей с большими радиусами скруглений в углах (см. рис.3, область *II б*):
а — квадратной; *б* — прямоугольной

4. Значения коэффициентов x и y

Относительный радиус углового закругления r/B	Относительная высота детали							
	0,3		0,4		0,5		0,6	
	x	y	x	y	x	y	x	y
0,10	—	—	1,09	0,15	1,12	0,20	1,15	0,27
0,15	1,050	0,08	1,07	0,11	1,10	0,17	1,12	0,20
0,20	1,040	0,06	1,06	0,10	1,08	0,12	1,10	0,17
0,25	1,035	0,04	1,05	0,08	1,06	0,10	1,08	0,12
0,30	1,030	0,04	1,04	0,06	1,05	0,08	—	—

при $r_д = r$

$$D_з = 1{,}13\sqrt{B^2 + 4B(h - 0{,}43r) - 1{,}72r(h + 0{,}33r)}.$$

Коробчатые детали, имеющие в плане прямоугольную форму, рассматривают как состоящие из двух половинок квадратных коробок шириной B, соединенных промежуточной частью размером $A - B$. Контур заготовки приобретает форму овала (рис. 6, *б*). При этом ширина овальной заготовки

$$B_з = \{D_з(B - 2r_д) + [B + 2(h + 0{,}43r_д)](A - B)\}/(A - 2r_д),$$

ее длина

$$L_з = D_з + (A - B).$$

При $A - B \leqslant (0{,}03 \div 0{,}06)L$ можно выбрать круглую заготовку ($D_з = L_з$).

Области *Ia*, *Iб* и *Ic* на рис. 3 соответствуют многопереходной вытяжке коробчатых деталей. Область *Ia* соответствует деталям с $h/B \leqslant 0{,}8$ и малыми радиусами скруглений в углах. Как правило, переходы, следующие за первым, предназначены для уменьшения (калибровки) скруглений в боковых и донных углах. Построение контура заготовки производят по изложенной выше методике; при этом радиус R определяют по формуле

$$R = (1{,}1 \div 1{,}2)\sqrt{2rh}.$$

Коэффициент 1,1—1,2 вводят для того, чтобы учесть происходящее при выполнении последующих переходов вытеснение металла из угловых областей заготовки в плоские стенки детали. Дуги угловых скруглений описываются радиусами из различных центров.

Последующие переходы осуществляют без прижима заготовки, поэтому зазор между пуансоном и стенками коробчатой детали должен быть не более $b = 5s$ (равным 1 мм).

Увеличение высоты детали на каждом из последующих переходов

$$\Delta h = b - 0{,}43\,[r_{дn} - r_{дn+1}],$$

где $r_{дn}$ и $r_{дn+1}$ — радиусы донных закруглений соответственно на n и $n + 1$ переходах.

Область *Ic* на рис. 3 включает коробчатые детали, у которых $h/B > 0{,}8$.

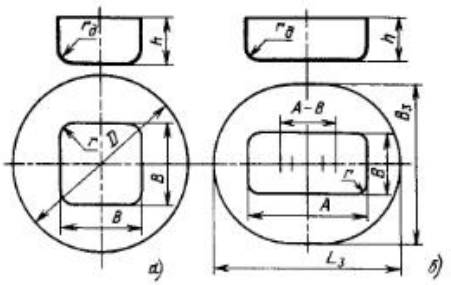


Рис. 6. Контур заготовки для вытяжки высоких коробчатых деталей (см. рис. 3, область *II c*):
а — квадратной; *б* — прямоугольной

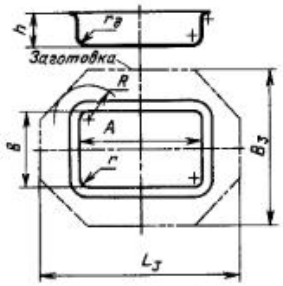


Рис. 7. Упрощенный способ построения контура заготовки при вытяжке коробчатой детали

В этом случае контур заготовки круглый или овальный. Размеры его определяют согласно рекомендациям, приведенным выше для области *IIc*. Расчетную высоту $h_р$ принимают равной (1,05÷1,1 %) h.

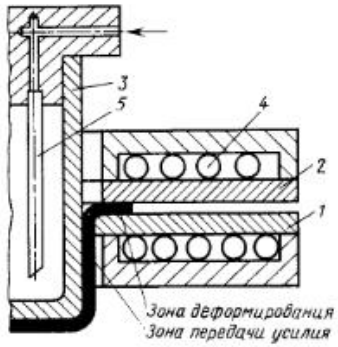


Рис. 8. Схема штампа для вытяжки с подогревом фланца:
1 — матрица; *2* — прижим; *3* — пуансон; *4* — нагревательные элементы; *5* — трубка для подачи охлаждающей жидкости

5. Предельные значения коэффициентов вытяжки заготовок из цветных сплавов

Радиус сопряжения плоских стенок детали r, мм	Материал заготовки	Квадратная в плане				Прямоугольная в плане			
		20 °С		Рекомендуемая температура *		20 °С		Рекомендуемая температура *	
		$K_п$	h/A	$K_п$	h/A	$K_п$	h/A	$K_п$	h/A
2,5	АМ	7,19	0,58	13,3	1,50	7,57	0,62	12,0	1,46
	АМцМ	7,46	0,61	12,8	1,44	8,00	0,64	11,6	1,44
	Д16АМ	8,00	0,68	13,9	1,58	8,40	0,71	12,6	1,51
	МА1; МА8	—	—	25,0	2,73	—	—	27,0	2,93
5,5	АМ	4,00	0,60	6,6	1,51	4,18	0,62	6,89	1,57
	АМцМ	4,36	0,66	6,6	1,45	4,54	0,68	6,71	1,43
	Д16АМ	4,73	0,79	7,7	1,72	4,90	0,85	7,30	1,72
	МА1; МА8	—	—	12,5	2,89	—	—	13,7	3,12
10,5	АМ	2,56	0,63	4,17	1,52	2,66	0,66	4,10	1,60
	АМцМ	2,76	0,68	4,17	1,46	2,86	0,71	4,38	1,55
	Д16АМ	3,14	0,88	4,76	1,82	3,22	0,90	4,78	1,83
	МА1; МА8	—	—	7,14	3,06	—	—	8,00	3,22

* Для алюминиевых сплавов Д16АМ, АМцМ, АМ рекомендуемая температура 320—340 °С; для магниевых сплавов МА1, МА8 — 360—380 °С.

Коробчатые детали с фланцем при $h/B \leqslant 0{,}6$ вытягивают за один переход, а при малых радиусах проводят еще и калибровку. После вытяжки необходима обрезка фланца, поэтому при построении контура заготовки следует учитывать припуск на обрезку.

В условиях мелкосерийного производства А. Я. Фрейдлин предлагает упрощенный способ построения контура заготовки коробчатых деталей. У такой заготовки отсутствуют криволинейные участки (рис. 7). В этом случае размеры заготовки определяют из следующих выражений:

$$B_з = 2\,[B/2 + h - 0{,}43\,(r + r_д)];$$

$$L_з = 2\,[A/2 + h - 0{,}43\,(r + r_д)].$$

Строгой методики для построения контура заготовки коробчатых деталей сложной пространственной формы (типа деталей автомобильного кузова) в настоящее время не существует. Поэтому контур заготовки выбирают ориентировочно с учетом соображений, приведенных выше, и уточняют после проведения пробных штамповок в процессе наладочных работ.

Вытяжка с применением местного нагрева. Для увеличения возможности формоизменения за один переход при вытяжке коробчатых деталей применяют местный нагрев пластически деформируемой части заготовки. Для этой цели в штамп встраивают различные нагревательные элементы. На рис. 8 показана схема штампа для вытяжки детали с подогревом фланца. В результате локального нагрева штампа напряжение текучести во фланце у деформируемой заготовки резко уменьшается, а в трубчатой части заготовки (стенке) остается высоким. В этом случае допустимое напряжение на разрыв в опасном сечении остается на уровне холоднокатаной заготовки.

В табл. 5 приведены значения $K_п$ и h/A.

Глава 7 ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ (ВЫТЯЖКА—ПРОТЯЖКА)

Вытяжку с утонением применяют при изготовлении цилиндрических деталей глубиной до 10 диаметров (гильзы, тонкостенные трубы, баллоны и т. п.) из латуни, низкоуглеродистой стали, алюминия и других материалов, обладающих достаточной пластичностью в холодном состоянии. Этот способ позволяет получить детали, имеющие относительно точные размеры и высокие прочностные свойства, в два-три раза превышающие прочность исходного материала. Последнее обеспечивается упрочнением металла при деформировании в сочетании с соответствующей термической обработкой. Возможности формоизменения за одну операцию ограничены разрушением стенки по выходе из матрицы, требуемой точностью полуфабрикатов, работоспособностью смазочного покрытия, тепловыделением в очаге деформации и другими факторами. Какой из перечисленных факторов является лимитирующим, зависит от требований, предъявляемых к изделию, состояния и пластических свойств материала, интенсивности упрочнения, наличия дефектов, а также от геометрических параметров инструмента, условий охлаждения и применяемого смазочного материала.

1. ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЗАГОТОВКИ

При вытяжке с утонением в матрицу диаметром D_{n+1} устанавливают полую заготовку диаметром D_n. Пуансон диаметром d_{n+1} входит в заготовку толщиной s_n с небольшим зазором и в процессе выполнения операции проталкивает ее через одну или несколько (от двух до пяти) матриц, расположенных одна под другой соосно с пуансоном. Диаметры последовательно уменьшающихся рабочих частей матриц меньше наружного диаметра заготовки. Соответственно уменьшающийся зазор между пуансоном и матрицей меньше толщины s_n стенки заготовки. Следовательно, при вытяжке уменьшается как диаметр, так и толщина стенки и одновременно увеличивается длина вытягиваемой детали. Вытянутая таким образом деталь плотно прилегает к поверхности пуансона. При обратном ходе пуансона деталь упирается в выходной скат матрицы или съемник и снимается с пуансона.

Как видно из рис. 1, элементарные силы трения в очаге деформации между пуансоном $\mu_п\sigma_п$ и матрицей $\mu_м\sigma_м$ имеют различные направления. Поскольку заготовка смещается относительно матрицы в направлении движения пуансона, силы трения, действующие на наружной поверхности заготовки, имеют направление, обратное движению пуансона. Удлинение заготовки при утонении приводит к тому, что в очаге деформации она скользит вверх по пуансону, а силы трения на внутренней поверхности заготовки действуют в направлении движения пуансона.

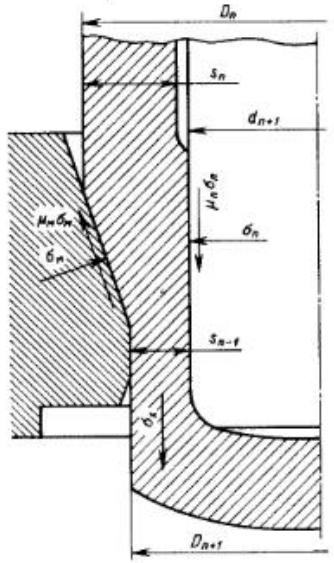


Рис. 1. Схема напряжений, действующих в очаге деформации

Силы трения на наружной поверхности заготовки способствуют увеличению растягивающих напряжений σ_x, действующих в стенках протянутой части заготовки, а силы трения на внутренней поверхности заготовки как бы разгружают опасное сечение, уменьшая растягивающие напряжения в стенках протянутой части заготовки. Эта особенность вытяжки с утонением и является основной причиной сравнительно больших допустимых деформаций и значительного приращения относительной высоты заготовки за один переход.

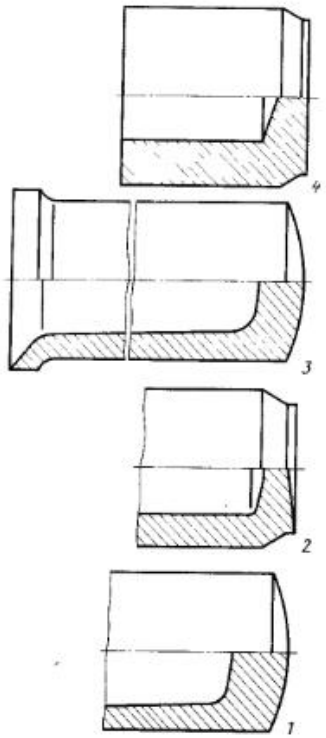


Рис. 2. Типы заготовок, полученные:
1 — комбинированной вытяжкой; *2* — обратным выдавливанием; *3* — прямым выдавливанием; *4* — механической обработкой резанием

Заготовки для вытяжки с утонением могут быть (рис. 2) получены комбинированной вытяжкой, обратным и прямым выдавливанием; реже горячей штамповкой с последующей механической обработкой.

На заготовках не допускаются дефекты, не поддающиеся исправлению, — грубые забоины, надрывы, запрессовка, расслоение металла, плены и др.

Разностенность заготовки не должна превышать 3,5—5 % толщины стенки. Поля допусков диаметральных размеров должны соответствовать $h11$—$h12$.

В случае получения заготовки механической обработкой следует учитывать параметры шероховатости поверхности: $Rz = 6{,}3 \div 40$ мкм. С увеличением Rz ухудшаются условия формирования фосфатной пленки, используемой для уменьшения трения при обработке стали, и повышается вероятность разрушения слоя покрытия.

2. ФОРМЫ ПОЛУЧАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТА

Форма деталей при вытяжке с утонением. Наиболее часто вытяжку с утонением используют для получения деталей (полуфабрикатов) *1* (рис. 3), имеющих наружную поверхность цилиндрическую, а внутреннюю — коническую. Возможно получение деталей с наружным *2* и внутренним *3* уступами. Детали *4* и *5* получают из деталей *2* и *3* соответственно с использованием в первом случае обжима, а во втором — раздачи. Дно детали получается выпуклым. Для получения плоского дна необходимо вводить дополнительную операцию.

Конусность пуансона должна быть в пределах 0,0005—0,1. Обратная конусность не допускается, за исключением случаев, когда необходимо получить небольшое утолщение стенки детали на малой длине.

Вытяжкой с утонением получают детали с полем допуска $h9$—$h12$. Допуск на толщину стенки доходит до 15—25 % номинальной толщины стен-

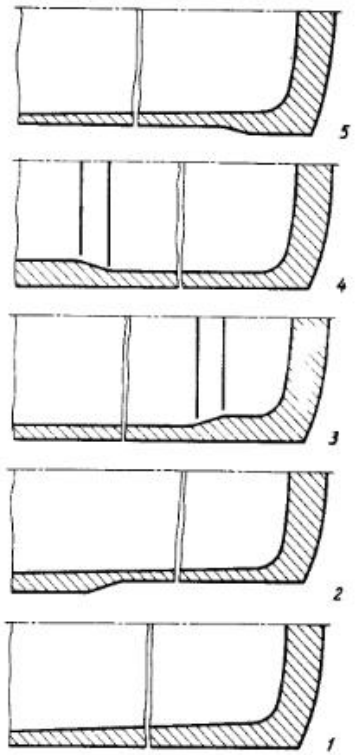


Рис. 3. Типы деталей, полученные вытяжкой с утонением:
1 — напровал; *2* — с остановом; *3* — ступенчатым пуансоном; *4* — с остановом и последующей калибровкой; *5* — ступенчатым пуансоном с последующей раздачей

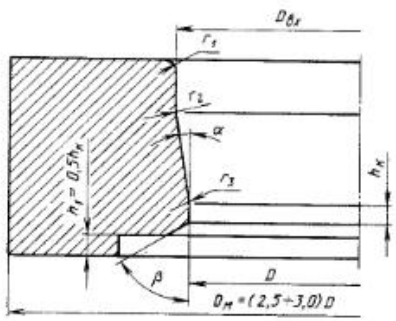


Рис. 4. Матрица для вытяжки с утонением

ки; на высоту полуфабриката, полученного вытяжкой, — до 15 % его длины. Обычно для получения заданной длины полуфабрикат обрезают, для чего предусматривают соответствующий припуск.

Форма рабочего инструмента. Инструмент для вытяжки с утонением стенки для специализированных прессов обычно включает в себя пуансон, матрицы (от одной до пяти) и съемник. Пуансон крепят к ползуну пресса, матрицы закрепляют на столе пресса. Способ крепления должен обеспечивать возможность быстрой смены инструмента.

Поскольку процесс вытяжки с утонением стенки требует относительно большого хода ползуна, направляющие устройства (обычно направляющая втулка) применяют только при жестких требованиях по разностенности, косине кромки и кривизне оси.

Матрица (рис. 4) имеет форму кольца. Поверхность ее полости состоит из направляющей (входной) цилиндрической части диаметром $D_{вх}$, рабочих частей — чаще всего конической с углом 2α при вершине и цилиндрической диаметром D, а также выходной конической части с углом при вершине 2β. Входная часть матрицы служит для центрирования заготовки относительно оси матрицы, что необходимо для получения полуфабрикатов заданной точности. Диаметр входной части матрицы рекомендуется принимать на 0,5—1,8 % больше диаметра заготовки. При вытяжке через несколько матриц направляющая часть делается только в верхней матрице. Часто направляющую часть выполняют в виде отдельного направляющего кольца, высота которого составляет 0,3—0,6 диаметра калибрующего пояска.

Угол рабочей конической части поверхности матрицы (угол ската) принимают $\alpha = 4 \div 22°$. При $\varepsilon \geqslant 0{,}5$ влияние угла α на усилие вытяжки незначительно; при $\varepsilon < 0{,}5$ минимальное усилие наблюдается при $\alpha = 8 \div 14°$.

Угол ската $\alpha = 4 \div 9°$ обеспечивает возможность повышения предельного формоизменения, более равномерную деформацию по толщине стенки, но при этом снижается точность детали,

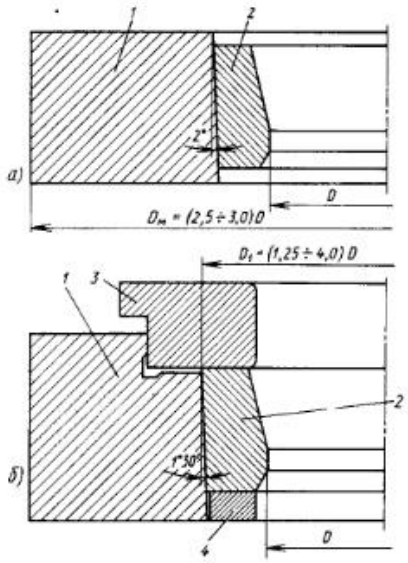


Рис. 5. Матрицы сборные армированные:
1 — бандаж; *2* — вкладыш; *3* — кольцо опорное; *4* — кольцо направляющее

растет разностенность и связанные с нею косина кромки и кривизна, увеличивается работа на преодоление сил трения. Высота конической части рабочей поверхности матрицы составляет 1,2—1,3 высоты очага деформации.

Калибрующий поясок обеспечивает формирование наружной поверхности детали. Его ширину принимают равной $h_к = (0{,}1 \div 0{,}05)D$. Меньшее значение принимают для матрицы большего диаметра. Увеличение ширины калибрующего пояска практически не влияет на усилие вытяжки, но увеличивает вероятность налипания металла.

Сопряжение рабочих поверхностей выполняется тороидальной поверхностью радиусом $r_3 = (0{,}5 \div 1{,}0)\,h_к$.

Выходную часть матрицы оформляют в виде конуса с углом $\beta = 20$ или 70°. При $\beta = 70°$ обеспечивается возможность съема распружинившего полуфабриката упором в выходной скат матрицы. В этом случае кромку, образованную пересечением поверхностей калибрующего пояска и выходного ската матрицы, делают острой. Съем с упором в выходной конус матрицы возможен при степенях деформации не более 40 % и глубине полуфабриката не более двух диаметров.

Выполнение угла $\beta = 20 \div 60°$ обеспечивает благоприятные условия работы калибрующего пояска (исключает его выкрашивание), но при этом необходимо специальное устройство (съемник) для съема полуфабриката с пуансона.

Для снижения себестоимости изготовляемых деталей и уменьшения расхода инструментальных сталей рекомендуется применять сборные матрицы (рис. 5). Вкладыш запрессовывается в бандаж с натягом $(0{,}0035 \div 0{,}0040)\,D_1$. Второй тип матрицы (рис. 5, *б*) обеспечивает возможность регулирования диаметра D калибрующего пояска за счет изменения глубины запрессовки при смене опорного кольца *4*.

При увеличении глубины запрессовки вкладыша в бандаж на 1 мм натяг увеличивают на 0,05 мм. Уменьшение δ диаметра калибрующей части матриц с увеличением глубины запрессовки x с достаточной точностью можно определить по формуле

$$\delta = 0{,}025 \frac{D}{D_1} \left(\frac{D_м^2 - D_1^2}{D_м^2 - D} \right) x.$$

При эксплуатации сборных матриц из строя выходит только вкладыш (царапины, задиры). Вкладыши можно подвергать многократному восстановлению путем шлифования, полирования и хромирования. Увеличение калибрующей части в этом случае можно компенсировать увеличением глубины запрессовки.

Применяют два типа крепления матрицы в приспособлении: жесткое и плавающее, когда матрица, имеющая возможность радиального смещения, самоустанавливается по заготовке. Последний тип крепления целесообразно применять при возможности центрирования полуфабриката по пуансону.

Пуансон (рис. 6). Рабочая поверхность пуансона (коническая с углом γ) сопрягается с торцом тороидальной поверхностью. Минимальная длина пуансона складывается из высоты заготовки, матриц с центрирующим кольцом, наибольшей глубины детали, вы-

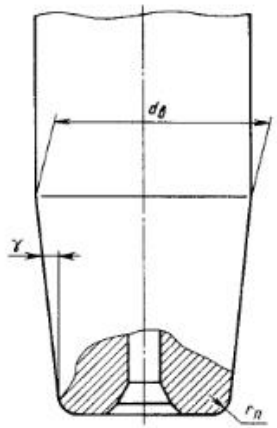


Рис. 6. Рабочая часть пуансона

соты съемника, свободного хода пуансона и высоты его крепления. Радиус тороидальной поверхности пуансона $r_п$ следует выполнить равным 0,5—2 толщины дна. В ходе технологического процесса от операцин к операции радиус обычно уменьшается.

Профиль пуансона каждой вытяжки в нижней части следует точно подгонять к полуфабрикату предыдущей вытяжки. Минимальный зазор $0{,}003\,d_п$) обеспечивает центрирование заготовки по пуансону и тем самым получение детали требуемой точности. Меньший зазор может привести к недоходу пуансона до дна заготовки, следствием чего будет образование внутреннего уступа в нижней части детали. Большой зазор между пуансоном и полуфабрикатом требует либо жесткого крепления матриц, либо применения центрирующей втулки, которая сопрягается с цилиндрической частью пуансона и внутренней поверхностью полуфабриката по *H8—H9*.

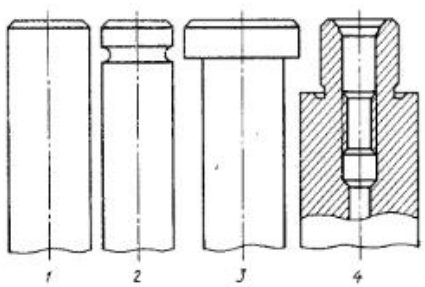


Рис. 7. Конструкции крепежной части пуансона

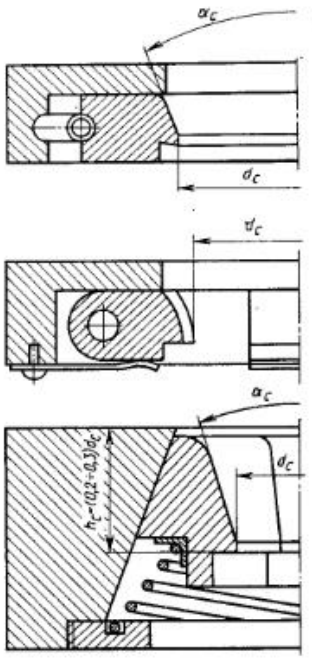


Рис. 8. Конструкции съемников

Как правило, в пуансонах, диаметр которых превышает 80 мм, сверлят сквозное осевое отверстие, чем достигается лучшая закалка пуансона вследствие его интенсивного и равномерного охлаждения. Кроме того, это отверстие служит для выхода смазывающей эмульсии и воздуха во время вытяжки.

Конструкции креплений пуансона показаны на рис. 7. Конструкции типов *1* и *2* применяют при диаметре пуансона до 30—50 мм; при бо́льших размерах используют крепления типов *3* и *4*.

Характеристики материалов для изготовления матриц и пуансонов приведены в табл. 1.

Съемники. При малой конусности пуансона, большой глубине детали (полуфабриката) (больше двух диаметров) и тоикой стеике полуфабриката, особенно у кромки, попытки снять полуфабрикат с помощью выходиого ската матрицы при обратном ходе пуансона приводят к затягиванию его в матрнцу, что сопровождается разрушением полуфабриката. В этих случаях применяют специальные приспособления — съемнки (рис. 8).

1. Материалы для изготовления пуансонов и матриц

Наименование	Материал	Обработка рабочей поверхности	*HRC*
Пуансон	Сталь У10А	Хромирование (Х6—Х12)	58—62
Матрица	То же	То же	62—64
Матрица сборная:			
бандаж	Сталь 40Х	—	48—52
вкладыш	Стали Х12М, Х12Ф, У10А	Хромирование (Х6—Х12)	58—62
	Твердые сплавы ВК8 и ВК15	—	—
кольцо направляющее	Сталь 45	Хромирование (Х6—Х12)	40—45
кольцо опорное	Сталь У10А	—	50—56

Съемники устанавливают под матрицей. Часто корпус съемника служит матрице опорой. Полуфабрикат снимают острыми кулачками, которые под действием пружины стремятся прижаться к поверхности пуансона. Во время вытяжки кулачки расходятся, полуфабрнкат проходит съемник, при обратном ходе кромкой упирается в острые края съемника и снимается. Конструкции съемиков показаны на рис. 8. Рабочий диаметр съемника

$$d_c = d_в + s_в,$$

где $d_в$ — диаметр пуансона вверху (см. рис. 6); $s_в$ — толщина стеики полуфабриката вверху.

Угол заходиого коиуса съемника обычно выполняют равиым 90°; для съемнпка с коиической поверхностью кулачков угол наклона образующей от оси принимают 20—30°.

Наружный диаметр корпуса съемнпка определяется конструкцией приспособления; как правнло, его принимают равным диаметру матрицы. Кулачки съемнпка изготовляют из стали У10А (*HRC* 50—56), корпус — нз стал 45 (*HRC* 45—50).

3. УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БРАКА

Продольные трещины и поперечные надрывы возникают при следующих условиях:

занижена температура отжига заготовок;

повышенное содержание углерода, серы, фосфора и неметаллических включений в металле;

большая конусность пуансона;

завышено усилие обжатия;

материал имеет повышенную анизотропию (отношение предела прочности образца, вырезанного вдоль прокатки и под углом 45° к направлению прокатки, больше 1,2).

Продольные царапины на наружной и внутренней поверхности возникают вследствие:

налипания металла на рабочей части матрицы (пуансона) в результате плохой термообработки;

грубо обработанной рабочая поверхности матрицы и пуансона;

низкого качества смазочного покрытия или смазочного материала;

отслаивания хромового покрытия;

отсутствие закруглений (в плане) в месте стыка секторов (кулачков) съемника или его перекоса;

загрязиение полуфабрикатов или смазочного материала.

Разностенность и сопутствующие ей косина кромки и искривление оси детали возникают вследствие:

перекоса осей матриц и пуансона (вследствие их неправильной установки);

неперпендикулярности опорной поверхности матрицы в приспособлении;

торцового биения опорной поверхности самой матрицы относительно оси рабочей поверхности;

большого зазора между пуансоном и заготовкой при использовании плавающих матриц. Для устранения дефектов необходимо уменьшить зазор между заготовкой и пуансоном у дна или применить центрирующую втулку, надеваемую на пуансон и входящую внутрь заготовки;

большого обжатия;

малого угла ската матриц.

Недостаточная прочность детали является следствием высокой температуры отжига, а также малого диаметра матрицы на предшествующей вытяжке и увеличенного на вытяжке, формирующей механические свойства.

Хрупкая деталь получается в результате низкой температуры отжига, а также увеличенного диаметра матрицы предшествующей операции и малого на вытяжке, формирующей механические свойства.

Короткий полуфабрикат получается при использовании изношенных пуансона или калибрующего пояска матрицы, малого угла ската матрицы, высокой температуры отжига, большого радиуса пуансона; **длинный** — при малом диаметре матрицы и большом диаметре пуансона, увеличенном (часто в результате изнашивания) угле рабочей поверхности матрицы и малом радиусе пуансона.

4. РАСЧЕТ СИЛОВЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Расчет усилия вытяжки. График изменения усилия вытяжки по ходу пуансона представлен на рис. 9. Кривая имеет следующие характерные участки:

0—1 — заполнение ската матрицы; длина этого участка

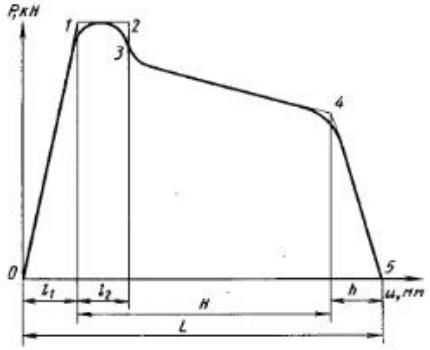


Рис. 9. Изменение усилия вытяжки по ходу и пуансона

$$l_1 = \frac{D_n - D_{n+1}}{2 \operatorname{tg} \alpha}$$

(индекс n — порядковый номер операции вытяжки);

1—2 — проталкивание дна; l_2 равно толщине дна;

2—3 — деформация придонной части полуфабриката;

3—4 — деформация стенки: положение точки *4* относительно точки *3* (рост или спад усилия) определяется в основном изменением толщины стенки по ходу пуансона;

4—5 — участок уменьшения очага деформации, $h \approx l_1$.

Полный ход пуансона

$$L = H + \frac{D_n - D_{n+1}}{\operatorname{tg} \alpha}, \qquad (1)$$

где H — высота полуфабриката после вытяжки; D_n — диаметр заготовки; D_{n+1} — диаметр полуфабриката; α — угол ската матрицы.

Пик усилия, возникающий при деформации донной части (участок *1—2*), не лимитирует степени утонения стенки но определяет выбор пресса. Появление пикового усилия при прохождении дна можно объяснить повышенным теплоотводом этого участка, вследствие чего температура поверхности контакта не меняется. При прохождении стенки теплоотвод ухудшается, и поверхность контакта нагревается, что вызывает уменьшение коэффициента трения (рис. 10).

Усилие на участке *1—2* (рис. 9) определяют по формуле

$$P_1 = \pi D_{n+1} s_д \sigma_в \operatorname{tg} (\alpha + \delta),$$

где $s_д$ — толщина дна; $\delta = \operatorname{arctg} \mu_м$.

Усилие в точках *3* и *4* определяется зависимостью

$$P_i = F_{(n+1)i} a_{(n+1)i} c_{(n+1)i} \quad i = 3, 4,$$

где $F_{(n+1)i}$ — площадь поперечного сечения детали после $n+1$ вытяжки в i-м сечении (в сечении *3* у дна $i = 3$; в сечении *4* у кромки $i = 4$); $a_{(n+1)i}$ — удельная работа деформации в соответствующем сечении полуфабриката; $c_{(n+1)i}$ — составляющая, учитывающая влияние трения по пуансону и матрице;

$$c_{(n+1)i} = 1 + \mu_м (1 - r_{n_i})(1 + \operatorname{ctg} \alpha) + 0{,}75 r_{n_i} \mu_п \operatorname{ctg} \alpha$$

($\mu_м$ и $\mu_п$ — коэффициенты трения соответственно по матрице и пуансону);

$$r_{n_i} = 1 - \frac{F_{(n+1)i}}{F_{n_i}};$$

$$a_{(n+1)i} = A (\varepsilon_{n_i})^{1+n}; \quad A = \frac{\sigma_в}{1+n} \left(\frac{2{,}718}{n} \right)^n;$$

$$n = \ln \left(1 + \frac{2\delta_{10} - \delta_5}{100} \right).$$

В этих формулах $F_n = \frac{\pi}{4} (D_n^2 - d_{n_i}^2)$ — площадь поперечного сечения заготовки; $\sigma_в$ — предел прочности материала заготовки; n — показатель степени кривой упрочнения; δ_{10} и δ_5 — относительные удлинения соответственно десятикратного и пятикратного образца; d_{n_i} — диаметр пуансона в сечении, в котором определяется усилие вытяжки;

$$\varepsilon_{n_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\ln \frac{F_{n_i}}{F_{(n+1)i}} + 0{,}5 \; P \right];$$

$$P = \frac{2\alpha + 5}{100} - p_{n_i}$$

где коэффициент P учитывается только при его положительном значении.

Смазочные материалы и покрытия. При вытяжке с утонением скорость скольжения, путь скольжения и удельные нагрузки в очаге деформации весьма велики. Это повышает вероятность молекулярного схватывания, т. е. образование наростов на поверхности матрицы и пуансона.

Смазочный материал должен обеспечивать отсутствие прихватывания материала заготовки к инструменту, высокое качество поверхности детали, износостойкость инструмента, а при высоких скоростях деформирования и использовании нескольких матриц (при $\psi > 0{,}65$) — эффективное охлаждение инструмента.

Для улучшения условий трения на заготовку перед вытяжкой наносят смазочные покрытия (табл. 2), обеспечивающие сохранение смазочного материала в очаге деформации. Смазочные покрытия наносят на очищенную от окислов поверхность заготовки. Окисную пленку с поверхности металлов удаляют травлением, дробеструйной обработкой, механическими способами и т. п. Смазочные покрытия целесообразно наносить следующими способами: меднением, фосфатированием, оксалатированием, известкованием и обработкой в растворе буры.

В качестве смазочного материала используют водные эмульсии натриевого и калиевого мыла. Эмульсию приготовляют из 60—72 %-ного хозяйственного мыла, из расчета 1 кг мыла на 10 л воды. Температура эмульсии 60—70 °С.

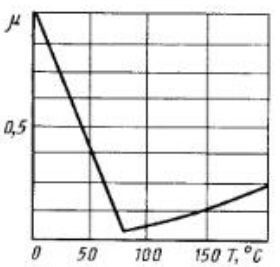


Рис. 10. Изменение коэффициента трения μ в зависимости от температуры поверхности заготовки (цена деления по оси μ 0,01, начало отсчета μ = 0,01)

2. Основные характеристики смазочных покрытий для вытяжки с утонением

Вид обработки	Состав	Содержание, г/л (%)	Режим обработки	Применение, особенности
Меднение	H_2SO_4 — 98 %-ная $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ HCl $Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$ ОП-7 (ОП-10) Столярный клей	15—40 15—30 До 40 50—60 2—4 0,2 кг на 1 м³	Температура 30—50 °С Время 1—3 мин	Для заготовок, подвергаемых деформированию при $\psi >$ > 60 % Толщина слоя 1—2 мкм
Фосфатирование	$Zn(H_2PO_4) \cdot 2H_2O$ $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ H_3PO_4 $NaCO_3$ NaOH $NaNO_3$	9—10 80—85 18—20 4,5—5 4,5—5 0,3—0,4	Кислотность: свободная 3—10, общая 30—65 Температура 20—40 °С Время 10—15 мин	Для углеродистых и легированных сталей, а также для некоторых цветных металлов и сплавов, содержащих хром, никель и молибден. Толщина слоя фосфатов 5—8 мкм
Оксалатирование (нанесение на поверхность заготовки слоя солей щавелевой кислоты)	$H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$ $FeC_2O_4 \cdot 12H_2O$ $K_2Cr_2O_7$ NaCl	24 12 3,5 200	Время 15—120 мин	Для высоколегированных сталей, цветных металлов и сплавов. В мыльном растворе на оксалатном покрытии образуется пленка металлических мыл, прочно сцепленная с поверхностью заготовки. Толщина покрытия 10—15 мкм

Продолжение табл. 2

Вид обработки	Состав	Содержание, г/л (%)	Режим обработки	Применение, особенности
Известкование (нанесение слоя извести путем многократного погружения) *	CaO MgO $FeO_3 \cdot Fe_2O_3$ Al_2O_3	(98,0—98,4) (0,88—0,90) (0,10—0,13) (0,50—0,64)	Известковый раствор перемешивают в ванне Срок службы раствора 1—2 недели Рекомендуется 2—6 одноминутных погружений Температура 90—100 °С После каждого извлечения садку выдерживают при 30—60 °С до высыхания Перед погружением поверхность обрабатываемого металла должна быть влажной	Для обработки углеродистых и коррозионно-стойких сталей, а также цветных металлов
Бурирование (обработка в растворе буры)	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$, или $Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$, или $Na_2B_4O_7$ $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	(5—30) 10 % от массы буры	Свободная кислотность 9,2 Температура 65—95 °С Рекомендуется двукратное погружение с выдержкой между погружениями не менее 0,5 мин	Можно наносить на фосфатированную поверхность Увеличения толщины покрытия достигают повышением концентрации раствора или увеличением времени выдержки

3. Допустимые значения относительного уменьшения ψ площади поперечного сечения заготовки при последовательной вытяжке через одну или несколько последовательно установленных матриц

Материал заготовки	Число матриц		
	1	2	3
Сталь мягкая с содержанием углерода менее 0,12 %	0,45—0,55	0,60—0,70	0,75—0,80
Сталь с содержанием углерода от 0,12 до 0,22 %	0,35—0,45	0,48—0,55	0,60—0,75
Латунь с содержанием цинка от 25 до 32 %	0,55—0,60	0,60—0,70	0,75—0,85
Алюминиевые сплавы (отожженные): АД0; АД1; АВ АМг6	0,45—0,55 0,35—0,45	0,60—0,70 0,50—0,55	0,75—0,80 0,60—0,75

Размеры заготовок под вытяжку с утонением определяют исходя из глубины детали. При использовании заготовки в виде кружка число операций определяется его толщиной:

$$s_0 = \gamma s_{ср}, \qquad (2)$$

где γ — коэффициент, зависящий от отношения глубины $h_д$ готовой детали к ее наружному диаметру $D_д$; $s_{ср}$ — средняя толщина дна детали.

Значения γ в зависимости от отношения $h_д/D_д$ приведены ниже.

$h_д/D_д$	1	2	3	4
γ	1,3	2,7	4	5,3
$h_д/D_д$	5	6	7	8
γ	6,7	8	9,3	10,6

Ориентировочно величину припуска на обрезку берут равной 0,3—1,5 диаметра детали. Чем больше высота детали, тем больше величина припуска.

Объем заготовки

$$V = \left(1 + \frac{П}{100}\right) V_{п.ф}, \qquad (3)$$

где припуск на обрезку $П = 10 \div 15$ % объема детали; $D_д$ — наружный диаметр детали; $V_{п.ф}$ — объем полуфабриката последней вытяжки (определяется разбивкой полуфабриката на элементарные фигуры с последующим вычислением их объемов по средним размерам).

Диаметр заготовки в виде кружка

$$D_{кр} = \sqrt{\frac{4V}{\pi s_0}}. \qquad (4)$$

Число операций вытяжки зависит от отношения толщины стенки готовой детали к толщине стенки заготовки, требуемой точности полуфабриката, пластических свойств металла и возможностей прессового оборудования (номинального усилия вытяжки, мощности, величины хода, точности и жесткости). Его определяют исходя из допустимого относительного уменьшения площади поперечного сечения стенки заготовки за одну операцию.

Относительное уменьшение площади поперечного сечения стенки за n операций

$$\psi_\Sigma = 1 - \frac{F_{n_i}}{F_{0_i}}, \qquad (5)$$

где F_{n_i} и F_{0_i} — площадь поперечного сечения соответственно стенки детали и стенки заготовки.

Величину ψ_Σ определяют у дна и у кромки.

Необходимое число операций определяют по сечению, где суммарная деформация наибольшая:

$$\frac{F_{n_i}}{F_{0_i}} = (1-\psi_\Sigma) = (1-\psi_1)(1-\psi_2)\ldots$$

$$\ldots(1-\psi_n) = (1-\psi_{ср})^n. \qquad (6)$$

Число операций вытяжки

$$n = \frac{\ln F_{n_i} - \ln F_{0_i}}{\ln(1-\psi_{ср})}. \qquad (7)$$

Среднее значение $\psi_{ср}$ принимают равным допустимому (табл. 3).

При правильно спроектированной заготовке ее внутренний диаметр в верхнем сечении должен быть равен внутреннему диаметру полуфабриката последней вытяжки в том же сечении (рис. 11), так как это обеспечивает минимальные разностенность, кривизну оси и косину кромки полуфабрикатов:

$$d_в = d_{n_в} = D - 2(s_{n_в} - 0{,}5\Delta s_{n_в}). \qquad (8)$$

Для промежуточных операций вытяжки

$$d_{1_в} = d_{2_в} = \ldots = d_{n_в}. \qquad (9)$$

Диаметр заготовки в нижнем сечении должен обеспечивать свободную (с зазором на вхождение) посадку пуансона в полуфабрикат соответствующей операции. Практика показывает, что чем больше зазор между стенками полуфабриката и пуансона, тем больше разностенность полуфабриката после вытяжки. В практике величину зазора

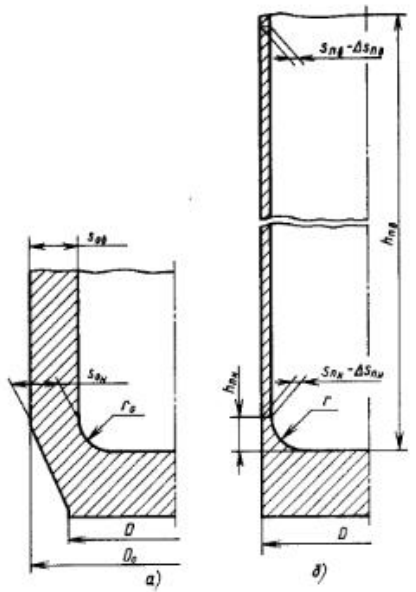


Рис. 11. Заготовка (*а*) и полуфабрикат (*б*)

λ на вхождение принимают равной примерно 0,003 диаметра пуансона в нижнем сечении.

Размеры инструмента. Диаметр пуансона промежуточной (k-й) вытяжки у дна

$$d_{k_н} = d_{n_п} + (1 + n - k)\lambda =$$

$$= d_{n_п}[1 + 0{,}003(1 + n - k)], \qquad (10)$$

где k — порядковый номер вытяжки с утонением; n — число последовательных вытяжек.

Диаметр матрицы D_k определяют в сечении, имеющем наибольшее относительное уменьшение площади поперечного сечения заготовки (обозначим его индексом i):

$$D_k = \sqrt{\frac{4F_{k_i}}{\pi} + d_{k_i}^2}, \qquad (11)$$

где F_{k_i} — площадь поперечного сечения k-го полуфабриката в i-м сечении; d_{k_i} — диаметр полуфабриката (пуансона) в i-м сечении.

Площадь поперечного сечения полуфабриката в i-м сечении определяют:
от заготовки

$$F_{k_i} = F_{(k-1)_i}(1 - \psi_{k_i}); \quad (12)$$

от детали

$$F_{k_i} = \frac{F_{(k+1)_i}}{1 - \psi_{k_i}}. \quad (13)$$

Последовательность расчета. 1. По чертежу детали назначают припуск на обрезку и определяют объем металла, необходимого для изготовления детали (полуфабриката).

2. Выбирают способ изготовления заготовки и ее форму, исходя из заданного объема металла и внутреннего контура детали.

3. Определяют число последовательных вытяжек, используя зависимость (7).

4. Вычисляют диаметры пуансонов промежуточных вытяжек по формулам (9) и (10).

5. Уточняют размеры заготовки:

$$D_0 = d_{0_i} + 2s_{0_i}, \quad (14)$$

где d_{0_i} — диаметр пуансона в сечении, где величина ψ_Σ максимальна; s_{0_i} — толщина стенки заготовки для вытяжки с утонением (определяется способом получения заготовки).

6. Определяют относительное уменьшение площади поперечного сечения на каждой вытяжке в сечении, где значение F_{n_i}/F_{0_i} максимальное:

$$\psi_{ср} = 1 - \sqrt[n]{\frac{F_{n_i}}{F_{0_i}}}. \quad (15)$$

7. Используя выражения (11)—(13), определяют диаметр матриц в том же сечении.

8. При применении нескольких матриц диаметр матрицы, определенный выше, соответствует диаметру нижней матрицы. Размеры остальных (верхних) матриц определяют по формуле

$$\psi_{k_i} = 1 - \frac{F_{k_i}}{F_{(k-1)_i}}, \quad (16)$$

где F_{k_i} и $F_{(k-1)_i}$ — площади поперечного сечения, где деформация наибольшая — соответственно полуфабриката и заготовки;

$$\psi_{j_i} = 1 - \sqrt[j]{\frac{F_{k_i}}{F_{(k-1)_i}}}, \quad (17)$$

где ψ_{j_i} — среднее относительное уменьшение площади поперечного сечения полуфабриката, приходящееся на матрицу; j — число матриц, или

$$\psi_{j_i} = 1 - \sqrt[j]{(1 - \psi_{ср})}.$$

Диаметр верхней матрицы

$$D_N = \sqrt{\frac{4F_{(k-1)_i}(1 - \psi_{j_i})^N}{\pi} + d_{k_i}^2}, \quad (18)$$

где N — порядковый номер матрицы в последовательности прохождения ее полуфабрикатом при вытяжке.

9. Определяют радиусы сопряжения боковой поверхности пуансона с его торцом:

$$R_k = R_0 - \frac{\lambda}{2}(1 + n - k), \quad (19)$$

где R_0 — радиус сопряжения дна со стенками заготовки (определяется технологическими возможностями способа получения заготовки); k — порядковый номер вытяжки; λ — зазор на вхождение пуансона в заготовку.

10. Определяют высоту расположения соответствующих диаметров пуансона:
нижнего

$$h_{k_н} = R_k(1 - \sin\gamma), \quad (20)$$

где γ — угол наклона образующей пуансона;

$$\gamma = \operatorname{arctg}\frac{d_{k_в} - d_{k_н}}{2\Delta h_k}; \quad (21)$$

верхнего

$$h_{k_в} = h_{k_н} + \Delta h_k, \quad (22)$$

где $\Delta h_k = \dfrac{\Delta h_{k-1}}{\sqrt{(1 - \psi_{k_в})(1 - \psi_{k_н})}}$. (23)

11. Для последней вытяжки, где получают заданные чертежом размеры

полуфабриката, необходимо определить допуски на изготовление и последующий износ инструмента.

Связь между соответствующими допусками на инструмент при вытяжке с утонением определяют по формуле

$$2\Delta s = \Delta D + \delta D + \Delta d + \delta d + 2\rho, \quad (24)$$

где Δs — допуск на толщину стенки полуфабриката; Δd и ΔD — допуски на изготовление соответственно пуансона и матрицы (принимают по 6—8 квалитету ЕСДП); ρ — допустимая разностенность полуфабрикатов (определяется технологическими возможностями производства и составляет 10—30 % толщины стенки); δd и δD — допуски на износ соответственно пуансона и матрицы (для инструмента промежуточных вытяжек принимают равными одному—двум допускам на изготовление).

Рассмотрим три варианта расчета допусков на изготовление и износ инструмента.

1. Задан допуск на толщину стенки, тогда допуски на износ пуансона и матрицы

$$\delta D + \delta d = 2\Delta s - 2\rho - (\Delta d + \Delta D). \quad (25)$$

Если пуансон и матрица изготовлены из углеродистой стали, то $\delta d = 0{,}5\delta D$; поэтому

$$\delta D = \frac{2}{3}\left[(\Delta s - \rho) - \frac{\Delta d + \Delta D}{2}\right]. \quad (26)$$

Если пуансон из углеродистой стали, а вкладыш матрицы из твердого сплава, то $\delta d = \delta D$; получаем

$$\delta D = \frac{1}{2}\left[(\Delta s - \rho) - \frac{\Delta d + \Delta D}{2}\right]. \quad (27)$$

2. Задан допуск на наружный диаметр и толщину стенки детали. Диаметр матрицы последней вытяжки

$$D_n = D_д - \Delta D_д - \delta_м, \quad (28)$$

где $D_д$ — наружный диаметр детали; $\Delta D_д$ — допуск на этот диаметр; $\delta_м$ — увеличение размеров полуфабриката за счет его пружинения и тепловых деформаций матрицы; $\delta_м = (0{,}002 \div 0{,}003) D_д$, если матрица из углеродистой стали, и $\delta_м = 0$, если матрица имеет вкладыш из твердого сплава. Тогда

$$\delta D \leqslant \Delta D_д - \Delta D;$$

$$\delta D + \delta d = 2(\Delta s - \rho) - (\Delta D - \Delta d). \quad (29)$$

Распределение допусков на износ аналогично п. 1, но $\delta D + \Delta d \leqslant \Delta D_д$.

3. Задан допуск на внутренний диаметр и толщину стенки. Определяют диаметр пуансона последней вытяжки:

$$d_n = d_д - \Delta d_д - \delta_n, \quad (30)$$

где $d_д$ — внутренний диаметр детали; $\Delta d_д$ — допуск на этот размер; δ_n — увеличение размеров пуансона за счет нагрева; $\delta_n = \alpha d_{n_i} T$ ($\alpha = 15 \times 10^{-6}$ 1/°C — температурный коэффициент линейного расширения углеродистой стали; $T = 100 \div 150$ °C — температура нагрева пуансона). Тогда

$$\delta d \leqslant \Delta d_д - \Delta d; \quad (31)$$

$$\delta D + \delta d = 2(\Delta s - \rho) - (\Delta D - \Delta d). \quad (32)$$

Распределение допусков на износ аналогично п. 1, но $\delta d - \Delta d \leqslant \Delta d_д$.

Типовой технологический процесс изготовления детали включает следующие операции.

1. Контроль заготовок по внешнему виду (100 %).
2. Контроль размеров высоты, диаметра и стенки на разностенность (5—10 % от партии).
3. Отжиг заготовок (контроль механических свойств — выборочно).
4. Травление (контроль по наружному виду — выборочно).
5. Нанесение смазочного покрытия (в случае необходимости).
6. Контроль по наружному виду с целью определения сплошности и качества покрытия.
7. Вытяжка с утонением (контроль в соответствии с вышеизложенным).
8. Отжиг заготовок.
9. Травление.
10. Нанесение смазочного покрытия (в случае необходимости).

11. Вытяжка с утоненнем.
12. Обезжиривание.
13. Обрезка.

Далее повторяется необходимое число операций (3—6).

14. Обезжиривание.
15. Обрезка.
16. Снятие заусенцев.
17. Контроль.
18. Исправление дефектов (по мере необходимости).
19. Нанесение покрытия.
20. Контроль.

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Требуется разработать технологический процесс и инструмент для изготовления стакана диаметром 52 мм из стали 11 кп (рис. 12).

1. Определяют припуск на обрезку:

$$\Delta h = (0{,}3 \div 1{,}5)\, D_д \approx 1 \cdot 52 = 52 \text{ мм}.$$

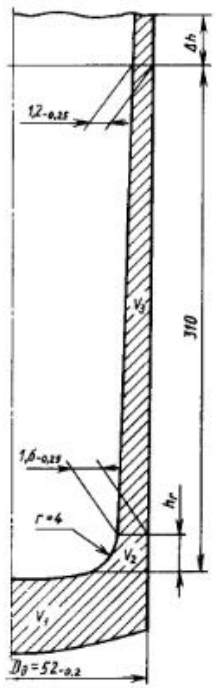


Рис. 12. Эскиз полуфабриката полученного вытяжкой с утонением ($s_в = 1{,}2$ мм; $s_н = 1{,}6$ мм)

2. Вычисляют объем полуфабриката, разбивая его на элементарные фигуры. Расчет ведут по средним размерам (прогибом дна пренебрегают). Толщину дна принимают равной толщине заготовки, которую получают вытяжкой.

Согласно формуле (2) и значениям γ, приведенным выше,

$$\frac{h_д}{D_д} = \frac{310}{52} \approx 6;$$

$$s_0 = \gamma s_{ср} = \gamma \frac{s_в + s_н}{2} = 11{,}2 \text{ мм}.$$

Объем донной части

$$V_1 = \frac{\pi 51{,}9^2 \cdot 11{,}2}{4} = 23682 \text{ мм}^3.$$

Внутренняя поверхность стенки имеет радиус $r = 4$ мм. Угол наклона внутренней поверхности стенки стакана

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{s_н - s_в}{h_д} = \operatorname{arctg} \frac{1{,}6 - 1{,}2}{310} = 0{,}074°.$$

Высота участка, мм

$$h_r = r(1 - \sin\gamma) = 4(1 - \sin 0{,}074) = 3{,}99 \approx 4.$$

Внутренний объем участка высотой h_r (от дна)

$$V_{вн} = \pi\left[(r-a)(c^2 - r^2) - \frac{r^3 - a^3}{3} + cr^2\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin\frac{a}{r}\right) - ca\sqrt{r^2 - a^2}\right],$$

где $a = r \sin\gamma = 4 \sin 0{,}074 = 0{,}005 \approx 0$; $c = 0{,}5\, d_н - r$.

Диаметр пуансона последней вытяжки (у дна)

$$d_н = (D_д - 0{,}5\Delta D_д) - 2(s_н - 0{,}5\Delta s_н) = (52 - 0{,}5 \cdot 0{,}2) - 2(1{,}6 - 0{,}5 \cdot 0{,}25) = 48{,}95 \text{ мм}.$$

Имеем $c = 0{,}5 \cdot 48{,}95 - 4 = 20{,}48$ мм, тогда

$$V_{вн} = 3{,}14\left[(4-0)(20{,}48^2 + 4^2) - \frac{4^3 - 0}{3} + 20{,}48 \cdot 4^2 - 20{,}48 \cdot 0\right] = 7156 \text{ мм}^3.$$

Объем наружной поверхности участка высотой h_r

$$V_{нар} = \frac{3{,}14 \cdot 51{,}9^2}{4} 4 = 8462 \text{ мм}^3;$$

$$V_2 = V_{нар} - V_{вн} = 8462 - 7156 = 1306 \text{ мм}^3.$$

Внутренний диаметр пуансона последней вытяжки (у дна)

$$d_в = d_н + 2(h_д + \Delta h)\operatorname{tg}\gamma = 48{,}95 + 2(310 + 52)\operatorname{tg} 0{,}074 = 49{,}89 \text{ мм}.$$

Объем стенки:
наружный

$$V_н = \frac{\pi D_д^2}{4}(h_д - h_r + \Delta h) = \frac{3{,}14 \cdot 51{,}9^2}{4}(310 - 4 + 52) = 757369 \text{ мм}^3;$$

внутренний

$$V_в = \frac{\pi(h_д - h_r + \Delta h)}{12}(d_н^2 + d_в^2 + d_н d_в) = \frac{3{,}14(310 - 4 + 52)}{12} \times (48{,}95^2 + 49{,}89^2 + 48{,}95 \cdot 49{,}89) = 686739 \text{ мм}^3;$$

$$V_3 = 70\,630 \text{ мм}^3.$$

Объем заготовки с припуском

$$V = 95\,618 \text{ мм}^3.$$

Для проверки правильности выбора величины припуска определяют его объем и относительную величину:

$$V_{пр} = 3{,}14(51{,}9 - 1{,}075)\, 1{,}075 \times 52 = 8926 \text{ мм}^3;$$

$$П = \frac{V_{пр}}{V - V_{пр}} 100 = \frac{8926}{95618 - 8926} 100 = 10{,}3\ \%,$$

что соответствует рекомендациям.

Диаметр заготовки в виде кружка по формуле (4)

$$D_{кр} = \sqrt{\frac{4 \cdot 95618}{3{,}14 \cdot 11{,}2}} \approx 105 \text{ мм}.$$

Принимая $k_t = s_{0в}/s_0$ и считая, что для получения детали достаточно трех вытяжек, определяют внутренние диаметры заготовки (диаметры пуансона) по формулам (9) и (10):

$$d_{0н} = d_{1в} = 49{,}89 \text{ мм};$$

$$d_{0н} = 48{,}95[1 + (4-0)\,0{,}003] = 49{,}53;$$

$$s_{0н} = s_0 k_t = 11{,}2 \cdot 0{,}588 = 6{,}58 \text{ мм};$$

$$D_0 = d_{0в} + 2s_{0в} = 49{,}89 + 2 \cdot 6{,}58 = 63{,}05 \text{ мм}.$$

Радиус сопряжения дна со стенкой согласно (19)

$$R_0 = 4 + (0{,}003 \cdot 48{,}96)(4 - 0) = 4{,}6 \text{ мм}.$$

Объем элементов заготовки определяют аналогично полуфабрикату последней вытяжки.

Объем дна

$$V_1 = \frac{3{,}14 \cdot 63{,}05^2}{4} 11{,}2 = 34969 \text{ мм}^3.$$

Ввиду малой конусности пуансона принимают $a = 0$,

$$c = 0{,}5 \cdot 49{,}53 - 4{,}6 = 20{,}17 \text{ мм}.$$

Объем стенки

$$V_{вн} = 3{,}14\left[(4{,}6 - 0)(20{,}17^2 + 4{,}6^2)\frac{4{,}6^3 - 0}{3} + 20{,}17 \cdot 4{,}6^2 \times (3{,}14 - \arcsin 0) - 20{,}17 \cdot 0\right] = 8189 \text{ мм}^3;$$

$$V_н = \frac{3{,}14 \cdot 63{,}05^2}{4} 4 = 12489 \text{ мм}^3;$$

$$V = 12489 - 8189 = 4300 \text{ мм}^3.$$

Объем стенки заготовки

$$V_{ст} = 95618 - 34969 - 4300 = 56\,349 \text{ мм}^2.$$

Ввиду малой внутренней конусности заготовки ее высота

$$\Delta h_0 = \frac{4V_{ст}}{\pi\left(D_0^2 - d_{0ср}^2\right)} = \frac{4 \cdot 56349}{3{,}14\left[63{,}05^2 - \left(\frac{49{,}89 + 49{,}53}{2}\right)^2\right]} = 47 \text{ мм}.$$

По формуле (5) определяют относительное уменьшение площади поперечного сечения стенки за все n операций вытяжки $\psi_{\Sigma_н}$ и $\psi_{\Sigma_в}$ вверху и внизу. Площадь поперечного сечения заготовки F_{0i} и полуфабриката последней вытяжки F_{n_i} у кромки и у дна

$$F_{0_в} = 3{,}14\,(63{,}05 - 6{,}58)\,6{,}58 = 1167 \text{ мм}^2;$$

$$F_{0_н} = 3{,}14\,(63{,}05 - 7{,}045)\,7{,}045 = 1240 \text{ мм}^2;$$

$$F_{n_в} = 3{,}14\,(51{,}9 - 1{,}075)\,1{,}075 = 172 \text{ мм}^2;$$

$$F_{n_н} = 3{,}14\,(51{,}9 - 1{,}475)\,1{,}475 = 234 \text{ мм}^2.$$

Отсюда

$$\psi_{\Sigma_в} = 1 - \frac{172}{1167} = 0{,}854;$$

$$\psi_{\Sigma_н} = 1 - \frac{234}{1240} = 0{,}811.$$

Поскольку $\psi_{\Sigma_в} > \psi_{\Sigma_н}$, расчет числа вытяжек ведут по верхнему сечению. Допустимое значение ψ принимают в соответствии с табл. 3. Для вытяжки через две матрицы $\psi_{ср} = 0{,}65$; в соответствии с выражением (7)

$$n = \frac{\ln 172 - \ln 1167}{\ln(1 - 0{,}65)} = 1{,}82.$$

Число вытяжек принимают равным двум. Поскольку расхождение в числе вытяжек невелико, изменения размеров заготовки не требуется. Погрешность можно компенсировать увеличением зазоров на вхождение пуансона в заготовку в 1,3 раза.

Расчет размеров инструмента и полуфабриката первой вытяжки:

$$d_{1_в} = d_{n_в} = 49{,}89 \text{ мм};$$

по формуле (10)

$$d_{1н} = 48{,}95 \cdot 1 + 1{,}3 \cdot 0{,}003\,(3 - 1) = 49{,}33 \text{ мм}.$$

Приняв две вытяжки, $\psi_{ср}$ на каждой вытяжке по формуле (15)

$$\psi_{ср} = 1 - \sqrt{\frac{172}{1167}} = 0{,}616.$$

Диаметр нижней матрицы (11)

$$D_{1_2} = \sqrt{\frac{4\,(1 - 0{,}616)\,1167}{3{,}14} + 49{,}89^2} = 55{,}3 \text{ мм}.$$

Используя выражения (11)—(17), определяют диаметр верхней матрицы. В верхней матрице по формуле (18)

$$\psi_{1_1} = 1 - \sqrt{2 - 0{,}616} = 0{,}38;$$

$$D_{1_1} = \sqrt{\frac{4\,(1 - 0{,}38)\,1167}{3{,}14} + 49{,}89^2} = 58{,}4 \text{ мм}.$$

Радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом (19)

$$r = 4 + \frac{0{,}003 d_{1н}}{2}\,(2 - 1 + 2) = 4{,}2 \text{ мм}.$$

Определяют высоты расположения верхнего и нижнего диаметров пуансона. Ввиду малой конусности

$$h_r = r = 4{,}2 \text{ мм}.$$

Объем дна

$$V_1 = \frac{3{,}14 \cdot 55{,}3^2}{4}\,11{,}2 = 26\,900 \text{ мм}^3.$$

При $a = 0$ и $c = 0{,}5 \cdot 49{,}33 - 4{,}2 = 20{,}47$ мм объем стенки, ограниченной изнутри радиусом,

$$V_{вн} = 3{,}14\,[(4{,}2 - 0)\,(20{,}47^2 + 4{,}2^2) - \frac{4{,}2^3 - 0}{3} + 20{,}47 \cdot 4{,}2^2 \times \left(\frac{3{,}14}{2} - \arcsin 0\right) - 20{,}47 \cdot 0] = 7466 \text{ мм}^3;$$

$$V_н = \frac{3{,}14 \cdot 55{,}3^2}{4}\,4 = 9607 \text{ мм}^3;$$

$$V_2 = 2141 \text{ мм}^3.$$

Объем стенки

$$V_3 = 95618 - 26900 - 9607 = 59\,111 \text{ мм}^3.$$

Ввиду малой конусности внутренней поверхности

$$\Delta h = \frac{4 \cdot 59\,111}{3{,}14\left[55{,}3^2 - \left(\frac{49{,}89 + 49{,}33}{2}\right)^2\right]} = 126 \text{ мм}.$$

Используя формулу (23),

$$\Delta h \frac{47}{\sqrt{(1 - 0{,}616)\,(1 - 0{,}604)}} = 121 \text{ мм}.$$

Расчет размеров инструмента второй вытяжки: $d_{2_в} = d_{n_в} = 49{,}89$; $d_{1_н} = 48{,}95$ принимают по диаметру детали.

Диаметр нижней матрицы принимают равным минимальному размеру детали

$$D_n = D_д - \Delta D_д = 52 - 0{,}2 = 51{,}8 \text{ мм}.$$

Диаметр верхней матрицы второй вытяжки по формулам (13), (17) и (11)

$$D_{2_1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 172}{(1 - 0{,}38)\,3{,}14} + 49{,}89^2} = 53{,}3 \text{ мм}.$$

Высоты расположения соответствующих диаметров пуансонов принимают по детали: $h_{r_2} = h_r = 4$; $\Delta h = 362$ мм.

При определении допусков на инструмент последней вытяжки пружинение и нагрев не учитывают. Поле допуска размеров на изготовление матрицы $H7$; $\Delta D_n = 10$ мкм.

Разностенность заготовки

$$\rho = (0{,}10 \div 0{,}30)\,1{,}6 = (0{,}16 \div 0{,}48) \text{ мм};$$

принимают 0,2 мм.

Поле допуска размеров на изготовление пуансона $h6$;

$$\Delta d_n = 6 \text{ мкм};$$

$$\delta d_n + \delta D_n = 2\,(250 - 200) - (10 + 6) = 84 \text{ мкм}.$$

При использовании пуансона и матрицы, изготовленной из углеродистой стали, $\delta d_n = 28$ мкм; $\delta D_n = 56$ мкм.

Глава 8 ОБТЯЖКА

1. ОБТЯЖКА ШИРОКИМ ЛИСТОМ ИНСТРУМЕНТА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

При обтяжке широким листом инструмента с цилиндрической поверхностью (рис. 1, 2) кромки листа (точки D_1 и D_2), жестко зажатые в захватах обтяжного устройства, движутся относительно инструмента со скоростями $\bar{v}^1$ и $\bar{v}^2$ соответственно. Продольные составляющие $\bar{v}_1^i$ векторов $\bar{v}^i$ сообщают движение растяжения, а нормальные составляющие $\bar{v}_2^i$ — движение наматывания ветвей GD_i листа на поверхность инструмента. Материальная точка G листа в рассматриваемое мгновение или в течение всего процесса неподвижна, не скользит относительно поверхности инструмента. Скорость скольжения и сила трения в этой точке меняют свое направление. Признак неподвижности может переходить от одной материальной точки к другой.

Обтяжка цилиндрической поверхности инструмента с симметричной направляющей (см. рис. 1) может быть симметричной и несимметричной. Симметричная обтяжка (см. рис. 1, *а*) имеет место при соблюдении двух условий: 1) ветви GD_i симметричны в начале процесса; 2) векторы $\bar{v}^i$ симметричны в течение всего процесса. При нарушении симметрии материальная точка N, взятая в начале процесса на оси симметрии инструмента, смещается от оси в одну сторону, а точка G — в другую (рис. 1, *б*). Признак неподвижности, переходя от точки к точке, может дойти до точки C_2 и исчезнуть в поверхности контакта (см. рис. 1, *в*).

Обтяжка несимметричной цилиндрической поверхности инструмента (см. рис. 2) всегда несимметрична, причем на поверхности контакта листа с инструментом точка G может существовать (см. рис. 2, *а*), а может и не существовать (см. рис. 2, *б*).

Векторы $\bar{v}^i$ и их составляющие обычно меняются в ходе обтяжки. В частности (рис. 3), в начале процесса они могут иметь составляющие $\bar{v}_2^i$, сообщающие листу только движение наматывания на поверхность инструмента (см. рис. 3, *а*). Тогда траекторией движения точки D_i является эвольвента. Затем, после того, как достигнуто заданное значение угла α_i, — только составляющие $\bar{v}_1^i$, приводящие к растяжению ветвей листа (рис. 3, *б*). При этом точка D_1 (так же, как и точка D_2) движется по ломаной траектории $D_1(0)\,D_1(1)\,D_1(2)$. Характер изменения векторов $\bar{v}^i$ (траектории движения точки D_i) влияет на закономерность распределения деформации вдоль направляющей оболочки. Например, для одного и того же конечного положения точек D_i (2), но для разных их траекторий (см. рис. 3, *б* — справа) распределение деформации ε_1 (рис. 4, 5) вдоль GC_1D_1 (2), соответствующее траектории $D_1(0)\,D_1(1)\,D_1(2)$, более неравномерное (линия *1*, см. рис. 4), чем соответствующее траектории $D_1(0)\,D_1(2)$ (линия *2*).

В расчетах технологических параметров обтяжки оболочку, формуемую из листа, рассматривают как тонкостенную, безмоментную. Принимают, что ее ширина $B(0)$ (см. рис. 5) остается неизменной, поэтому деформация волокна Δx_2, взятого в направлении ширины в какой-либо точке A, $\varepsilon_2 = 0$. Плосконапряженное состояние частиц сочетается с плоскодеформированным:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3. \qquad (1)$$

Силы пластического растяжения [на единицу ширины $B(0)$], действующие в поперечных сечениях $C_i - C_i$ и

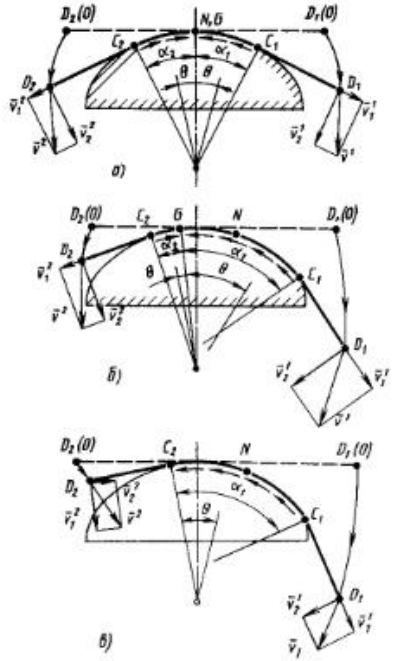


Рис. 1. Схемы симметричной (*а*) и несимметричной (*б* и *в*) обтяжки широким листом инструмента с симметричной цилиндрической поверхностью

$\theta - \theta$ для каждой зоны с неизменным направлением силы трения,

$$P(\theta) = P(C_i)\exp[-\mu(\alpha_i - \theta)]; \qquad (2)$$

$$P(C_i) = 2As(0) \times$$

$$\times [\varepsilon_0 + 2\varepsilon_1(C_i)/\sqrt{3}]^n/[\sqrt{3}\exp\varepsilon_1(C_i)]; \qquad (3)$$

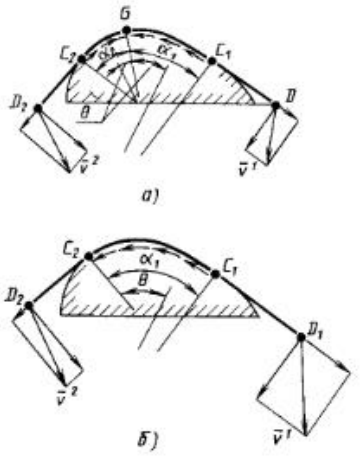


Рис. 2. Обтяжка широким листом инструмента с несимметричной цилиндрической поверхностью

$$P(\theta) = 2As(0) \times$$

$$\times [\varepsilon_0 + 2\varepsilon_1(\theta)/\sqrt{3}]^n/[\sqrt{3}\exp\varepsilon_1(\theta)], \qquad (4)$$

где μ — коэффициент трения; $s(0)$ — начальная толщина листа.

Толщина оболочки в сечении $\theta - \theta$

$$s(\theta) = s(0)/\exp\varepsilon_1(\theta), \qquad (5)$$

причем, если деформация $\varepsilon_1(C_i)$ в сечении $C_i - C_i$ задана, деформация в сечении $\theta - \theta$ может быть найдена с помощью равенства

$$[\varepsilon_0 + 2\varepsilon_1(\theta)/\sqrt{3}]^n/\exp\varepsilon_1(\theta) =$$

$$= [\varepsilon_0 + 2\varepsilon_1(C_i)/\sqrt{3}]^n/\exp\mu(\alpha_i - \theta) + \varepsilon_1(C_i). \qquad (6)$$

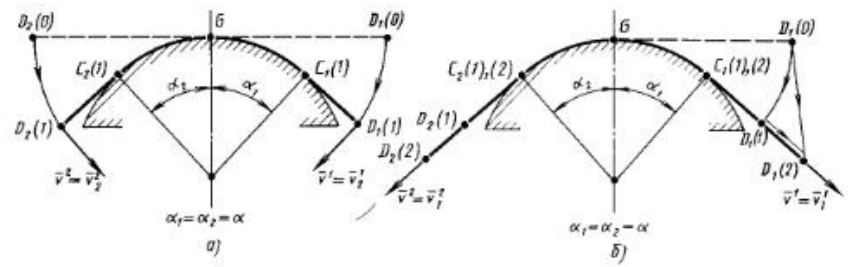


Рис. 3. Движение наматывания листа на цилиндрическую поверхность инструмента (*а*) и движение обтяжки (*б*)

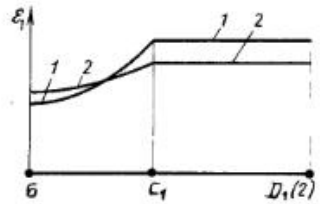


Рис. 4. Влияние траектории движения захвата относительно пуансона на характер распределения деформации:

1 — соответствует траектории D_1 (0) D_1 (1) D_1 (2); *2* — траектории D_1 (0) D_1 (2)

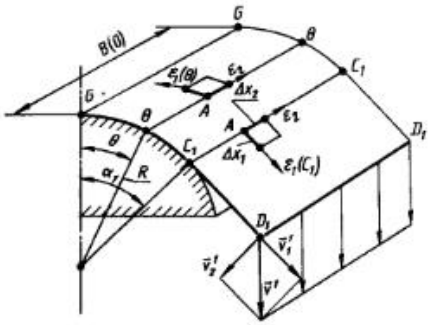


Рис. 5. Расчетная схема обтяжки

Начальная длина отрезков GC_i и C_iD_i (см. рис. 5)

$$GC_i\,(0) = \int_0^{\alpha_i} R\,d\theta/\exp\,\varepsilon_1\,(\theta),$$

$$C_i(0)\,D_i\,(0) = C_iD_i/\exp\,\varepsilon_1\,(C_i). \quad (7)$$

Согласно равенству (6) деформация $\varepsilon_1\,(\theta)$ убывает по углу θ от своего значения $\varepsilon_1\,(\theta) = \varepsilon_1\,(C_i)$ при $\theta = \alpha_i$. Предельное значение деформации $\varepsilon_1\,(C_i)$, при котором возникает локализация деформации [см. (4), гл. 1]

$$\varepsilon_{1ш} = n - \sqrt{3}\varepsilon_0/2. \quad (8)$$

Схемы обтяжки (см. рис. 1—3, 5) и равенства (1)—(8) взяты для расчета параметров предельного формоизменения листа.

Применительно к направляющим цилиндрических оболочек, изображенным на рис. 6 и 7, наибольшее растяжение металла имеет место на участке $MП$. Здесь и достигается предельное значение (8) деформации, ограничивающее формоизменение оболочки. Согласно изображенным схемам формоизменение осуществляется при неизменном расстоянии c между жестко зажатыми на матрице кромками листа. При этом по мере увеличения угла α обтяжки цилиндрических поверхностей матрицы и пуансона радиусами $R_м$ и $R_п$ участок $MП$ сокращается, а деформация ε_1 на нем и по всей образующей увеличивается. Для материальной точки, взятой между точками M и $П$, вектор скорости ее движения относительно пуансона или относительно матрицы содержит обе свои составляющие. Траектория движения точки имеет характер траектории D_1 (0) D_1 (2) (см. рис. 3, *б*). Приведенные ниже результаты расчетов получены при введении упрощения, что материальная точка, взятая на участке $MП$, движется по траектории D_1 (0) D_1 (1) D_1 (2). Для направляющей, изображенной на рис. 6, в табл. 1 даны предельные значения угла $\alpha_п$ и отношения h/a для различных значений

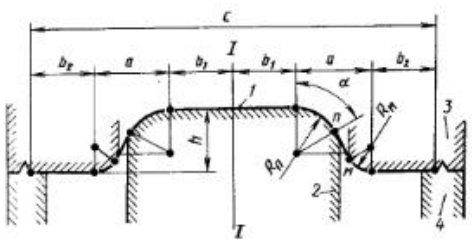


Рис. 6. Форма направляющей цилиндрической оболочки, принятая в расчете (результаты — см. в табл. 1, 2)

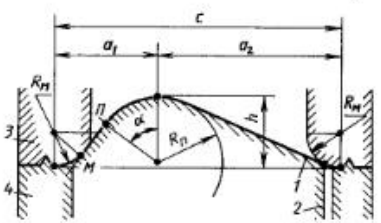


Рис. 7. Форма направляющей, принятая в расчете (результаты — см. рис. 9)

1. Предельные значения параметров $\alpha_п$ и $[h/a]_п$ направляющей цилиндрической оболочки (см. рис. 6) при $\mu = 0{,}1$; $\varepsilon_0 = 0$

b/a	Параметр	$n = 0{,}2$				$n = 0{,}3$			
		$(R_м + R_п)/a$				$(R_м + R_п)/a$			
		0,25	0,5	0,75	1,0	0,25	0,5	0,75	1,0
0	$\alpha_п$	0,623	0,636	0,654	0,679	0,753	0,755	0,806	0,858
	$[h/a]_п$	0,660	0,620	0,570	0,520	0,850	0,770	0.710	0,630
0,5	$\alpha_п$	0,676	0,695	0,721	0,760	0,820	0,850	0,894	0,976
	$[h/a]_п$	0,730	0,680	0,630	0,570	0,960	0,880	0,800	0,6690
1,0	$\alpha_п$	0,721	0,744	0,777	0,829	0,874	0,910	0,964	1,078
	$[h/a]_п$	0,800	0,740	0,680	0,610	1,060	0,970	0,880	0,740
2,0	$\alpha_п$	0,791	0,822	0,866	0,945	0,956	1,001	1,070	1,251
	$[h/a]_п$	0,920	0,840	0,770	0,680	1,230	1,130	1,010	0,830
4,0	$\alpha_п$	0,893	0,933	0,995	1,130	1,067	1,120	1,206	1,527
	$[h/a]_п$	0,090	1,010	0,910	0,770	1,540	1,410	1,260	0,970
8,0	$\alpha_п$	1,020	1,071	1,152	1,402	1,194	1,251	1,341	1,571
	$[h/a]_п$	1,410	1,290	1,150	0,910	2,100	1,950	1,770	—

b/a	Параметр	$n = 0{,}4$				$n = 0{,}5$			
		$(R_м + R_п)/a$				$(R_м + R_п)/a$			
		0,25	0,5	0,75	1,0	0,25	0,5	0,75	1,0
0	$\alpha_п$	0,857	0,886	0,928	1,013	0,942	0,974	1,025	1,145
	$[h/a]_п$	1,030	0,930	0,840	0,710	1,190	1,070	0,940	0,780
0,5	$\alpha_п$	0,933	0,971	1,029	1,170	1,023	1,065	1,134	1,344
	$[h/a]_п$	1,170	1,070	0,950	0,790	1,390	1,270	1,110	0,880
1,0	$\alpha_п$	0,990	1,035	1,106	1,306	1,083	1,131	1,210	1,516
	$[h/a]_п$	1,320	1,200	1,080	0,860	1,590	1,450	1,270	0,970
2,0	$\alpha_п$	1,077	1,129	1,213	1,538	1,168	1,222	1,308	1,571
	$[h/a]_п$	1,580	1,450	1,280	0,980	1,950	1,780	1,570	—
4,0	$\alpha_п$	1,185	1,243	1,332	1,571	1,269	1,324	1,405	1,571
	$[h/a]_п$	2,050	1,870	1,730	—	2,650	2,480	2,200	—
8,0	$\alpha_п$	1,300	1,354	1,431	1,571	1,370	1,415	1,477	1,571
	$[h/a]_п$	2,910	2,780	—	—	3,900	3,600	—	—

2. Предельные значения параметров $[(R_М + R_П)/a]_п$ $K_п$, $\alpha_п$ и $[h/a]_п$ направляющей цилиндрической оболочки (см. рис. 6) для случая, когда при $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1ш}$ участок $МП$ направляющей сливается в точку

b/a	Параметр	n			
		0,2	0,3	0,4	0,5
0	$K_п$	1,415	1,208	1,110	1,056
	$\alpha_п$	0,786	0,975	1,140	1,240
	$[h/a]_п$	0,410	0,530	0,630	0,730
0,5	$K_п$	1,298	1,124	1,050	1,013
	$\alpha_п$	0,879	1,097	1,260	1,410
	$[h/a]_п$	0,470	0,610	0,740	0,850
1,0	$K_п$	1,220	1,076	1,020	1,001
	$\alpha_п$	0,961	1,195	1,370	1,520
	$[h/a]_п$	0,520	0,680	0,820	0,950
2,0	$K_п$	1,139	1,027	—	1,000
	$\alpha_п$	1,072	1,340	—	—
	$[h/a]_п$	0,594	0,790	—	—
4,0	$K_п$	1,058	1,001	—	1,000
	$\alpha_п$	1,237	1,526	—	—
	$[h/a]_п$	0,725	0,956	—	—
8,0	$K_п$	1,007	1,000	—	1,000
	$\alpha_п$	1,450	1,571	—	—
	$[h/a]_п$	0,880	—	—	—

3. Предельное значение угла $\alpha_п$ для направляющей цилиндрической оболочки (см. рис. 6) при $\mu = 0,1$; $\varepsilon_0 = 0,1$

b/a	$n = 0,2$				$n = 0,3$				$n = 0,5$			
	$(R_М + R_П)/a$				$(R_М + R_П)/a$				$(R_М + R_П)/a$			
	0,25	0,5	0,75	1,0	0,25	0,5	0,75	1,0	0,25	0,5	0,75	1,0
0	0,467	0,466	0,466	0,465	0,637	0,644	0,655	0,668	0,863	0,882	0,912	0,967
0,5	0,472	0,472	0,472	0,472	0,675	0,686	0,701	0,722	0,931	0,961	1,006	1,104
1,0	0,477	0,477	0,478	0,478	0,706	0,720	0,739	0,767	0,985	1,021	1,078	1,221
2,0	0,485	0,486	0,486	0,487	0,756	0,755	0,800	0,838	1,065	1,109	1,181	1,413
4,0	0,496	0,496	0,498	0,499	0,828	0,852	0,886	0,942	1,167	1,219	1,301	1,571
8,0	0,506	0,509	0,510	0,511	0,919	0,949	0,993	1,072	1,279	1,330	1,408	1,571

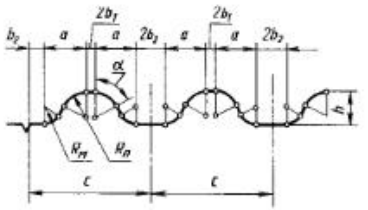


Рис. 8. Вид сечения ряда ребер жесткости

$(b_1 + b_2)/a = b/a$, $(R_М + R_П)/a$ и n при $\mu = 0,1$, $\varepsilon_0 = 0$. Отношение $(R_М + R_П)/a$ может быть таким, что в процессе формоизменения оболочки участок $МП$ сокращается до слияния в одну точку как раз в то мгновение, когда деформация ε_1 на нем и угол α достигают предельных значений. Это значение отношения $(R_М + R_П)/a_п$ приведено в табл. 2. В табл. 3 даны предельные значения угла $\alpha_п$ при $\mu = 0,1$, $\varepsilon_0 = 0,1$. Отмеченное выше упрощение расчетов занижает предельные значения угла $\alpha_п$ и отношения $[h/a]_п$ на 5—10 %.

По заданному отношению $(R_М + R_П)/a$ и найденному в табл. 3 значению угла α относительную предельную глубину оболочки определяют по формуле

$$h/a = \operatorname{tg}\alpha + (\sec\alpha - 1) \times (R_М + R_П)/a. \qquad (9)$$

Если на плоском листе располагается ряд ребер жесткости (рис. 8), расстояние c, относящееся к направляющей, изображенной на рис. 6, соответствует расстоянию между ребрами $c = 2(a + b_1 + b_2)$.

Для направляющей, изображенной на рис. 7, предельное значение угла $\alpha_п$ представлено на графике (рис. 9) в виде функции отношения a_2/a_1 для различных значений отношения $(R_М + R_П)/a$ и n при $\mu = 0,1$ и $\varepsilon_0 = 0$. Предельное значение отношения h/a_1

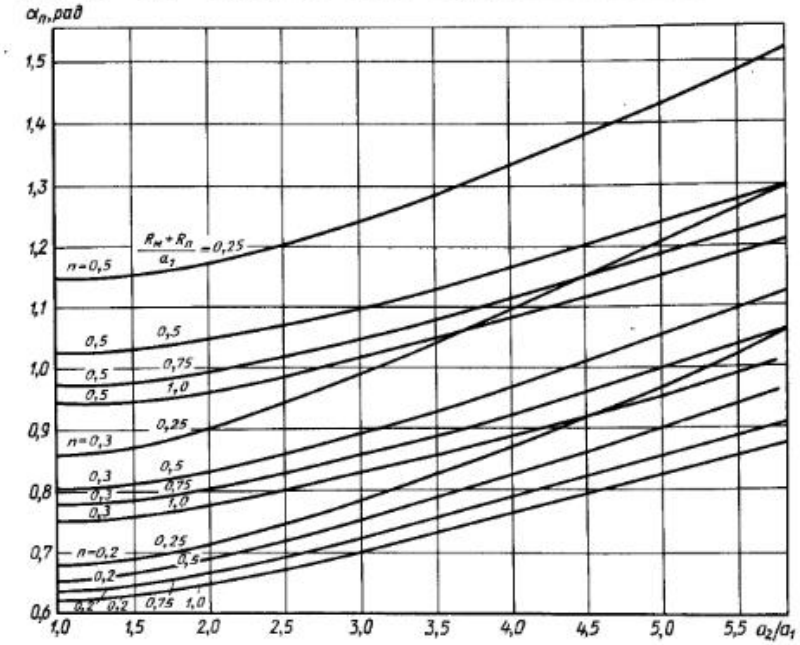


Рис. 9. Зависимость предельного угла $\alpha_п$ от геометрического параметра a_2/a_1 (см. рис. 7) при различных значениях параметра n кривой упрочнения металла и геометрического параметра $(R_М + R_П)/a_1$

4. Предельное значение $e = GD_1(2)/GD_1(1)$ (см. рис. 10), толщина s стенки оболочки и деформация ε_1 в точке G при различном числе z секций пуансона

n	Параметр	Число секций z									
		3	4	6	9	12	16	18	24	30	36
		$\alpha = 360/2z$, град									
		60	45	30	20	15	11,25	10	7,5	6	5
		$\mu = 0{,}05$; $\varepsilon_0 = 0$									
0,2	e	1,141	1,149	1,157	1,168	1,173	1,180	1,183	1,193	1,197	1,202
	s	0,905	0,895	0,886	0,876	0,862	0,854	0,852	0,849	0,844	0,840
	ε_1	0,100	0,110	0,121	0,132	0,149	0,158	0,160	0,164	0,170	0,175
0,3	e	1,240	1,254	1,263	1,280	1,290	1,298	1,305	1,312	1,317	1,322
	s	0,845	0,826	0,811	—	0,792	0,782	0,779	0,770	0,767	0,763
	ε_1	0,168	0,189	0,209	—	0,233	0,245	0,250	0,261	0,265	0,270
0,5	e	1,502	1,521	1,548	1,554	1,558	1,570	1,578	1,595	1,600	1,605
	s	0,729	0,707	0,687	—	0,661	0,648	0,644	0,639	0,635	0,631
	ε_1	0,316	0,347	0,375	—	0,414	0,433	0,440	0,447	0,454	0,461
		$\mu = 0{,}1$; $\varepsilon_0 = 0$									
0,2	e	1,110	1,122	1,138	1,150	1,155	1,166	1,170	1,180	1,183	1,190
	s	0,942	0,930	0,914	0,899	0,889	0,878	0,872	0,864	0,859	0,852
	ε_1	0,059	0,072	0,090	0,107	0,118	0,130	0,137	0,146	0,152	0,160
0,3	e	1,203	1,220	1,238	1,254	1,268	1,276	1,287	1,295	1,302	1,310
	s	0,891	0,875	0,853	0,834	0,822	0,807	0,804	0,792	0,787	0,779
	ε_1	0,115	0,134	0,159	0,181	0,196	0,214	0,218	0,233	0,240	0,250
0,5	e	1,444	1,468	1,498	1,514	1,522	1,540	1,547	1,563	1,570	1,580
	s	0,783	0,761	0,734	0,711	0,697	0,682	0,677	0,664	0,658	0,650
	ε_1	0,245	0,273	0,309	0,341	0,360	0,382	0,390	0,410	0,418	0,430
		$\mu = 0{,}2$; $\varepsilon_0 = 0$									
0,2	e	1,081	1,095	1,111	1,127	1,136	1,150	1,154	1,166	1,171	1,179
	s	0,970	0,958	0,942	0,926	0,914	0,900	0,896	0,883	0,876	0,869
	ε_1	0,031	0,043	0,060	0,077	0,090	0,105	0,110	0,125	0,132	0,140
0,3	e	1,161	1,179	1,204	1,227	1,239	1,255	1,260	1,275	1,283	1,292
	s	0,932	0,914	0,891	0,869	0,855	0,839	0,834	0,819	0,811	0,803
	ε_1	0,071	0,090	0,116	0,141	0,157	0,176	0,181	0,200	0,210	0,220
0,5	e	1,374	1,405	1,445	1,481	1,501	1,522	1,528	1,547	1,557	1,565
	s	0,841	0,815	0,782	0,753	0,733	0,715	0,710	0,694	0,684	0,677
	ε_1	0,173	0,205	0,246	0,284	0,310	0,335	0,342	0,365	0,380	0,390
		$\mu = 0{,}1$; $\varepsilon_0 = 0{,}1$									
0,2	e	1,000	1,000	1,036	1,050	1,059	1,067	1,069	1,075	1,080	1,084
	s	1,000	1,000	0,998	0,982	0,971	—	0,959	0,951	—	—
	ε_1	0,000	0,000	0,003	0,018	0,029	0,038	0,042	0,051	0,057	0,062
0,3	e	1,094	1,110	1,130	1,149	1,160	1,167	1,172	1,181	1,188	1,194
	s	0,972	0,954	0,932	0,912	0,899	—	0,884	0,874	—	—
	ε_1	0,029	0,047	0,071	0,093	0,107	0,120	0,124	0,135	0,140	0,149
0,5	e	1,309	1,335	1,365	1,390	1,404	1,419	1,423	1,435	1,440	1,445
	s	0,854	0,830	0,802	0,778	0,762	—	—	0,734	—	—
	ε_1	0,158	0,186	0,221	0,252	0,272	0,285	0,290	0,310	0,318	0,325

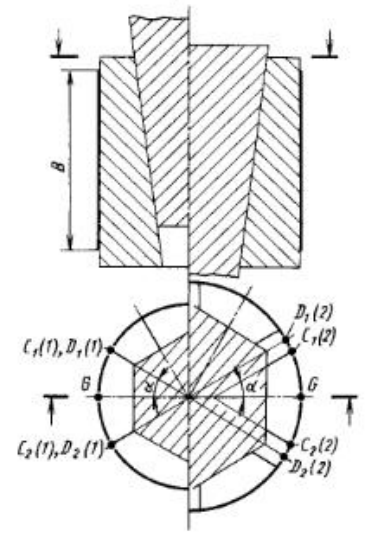


Рис. 10. Схема раздачи замкнутой (кольцевой) цилиндрической оболочки многосекционным пуансоном

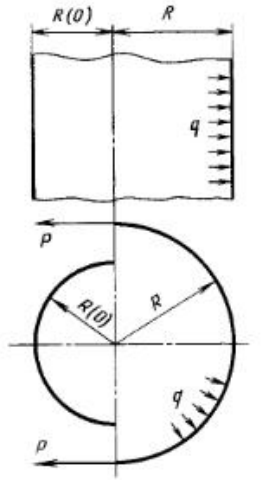


Рис. 11. Схема раздачи замкнутой цилиндрической оболочки эластичным (жидкостным) пуансоном

определяют по формуле (9), принимая $a = a_1$.

При раздаче замкнутой (кольцевой) цилиндрической оболочки с помощью расширяющегося многосекционного пуансона (рис. 10) каждая отдельная секция обтягивается по схеме, изображенной на рис. 3, *б*, причем движение наматывания, соответствующее отрезку $D_1(0)\ D_1(1)$ траектории, осуществлено в предварительной операции гибки листа при изготовлении цилиндрической оболочки так, что $C_1(1)\ D_1(1) = 0$.

Отношение длины направляющей оболочки, взятой после раздачи, к ее начальной длине $GD_1(2)/GD_1(1)$. Предельное значение e этого отношения (табл. 4) соответствует предельному значению (8) деформации в сечении $C_1(2) - C_1(2)$ оболочки. Чем больше секций в пуансоне, тем равномернее распределение деформации по направляющей оболочки. По мере увеличения числа секций отношение $e_{пр}$ стремится к числу $\exp(n - \sqrt{3}\varepsilon_0/2)$. Это число, отражает предельное относительное увеличение радиуса оболочки при раздаче жидкостью под давлением или эластичной средой; $R/R(0) = \exp(n - \sqrt{3}\varepsilon_0/2)$ (рис. 11). Давление

$$q = P/R,$$

где P определяют по формуле (3), принимая $P(C_i) = P$; $\varepsilon_1(C_i) = \varepsilon_1 = \ln|R/R(0)|$.

Табл. 4 может быть использована при определении параметров раздачи конической оболочки. Если угол конусности оболочки при раздаче остается неизменным, определение параметров предельного деформирования ведут по отношению к контуру малого основания, так как предельная деформация (8) достигается здесь раньше, чем на контуре большого основания. Для того чтобы предельная деформация достигалась одновременно по всему меридианному сечению конической оболочки, конусность оболочки при раздаче должна увеличиваться так, чтобы значение $GD_1(2)/GD_1(1)$ было одно и то же как для малого, так и для большого основания.

2. ОБТЯЖКА ШИРОКИМ ЛИСТОМ ИНСТРУМЕНТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ

При обтяжке инструмента с двояковыпуклой и выпукловогнутой поверхностью заготовкой является цилиндри-

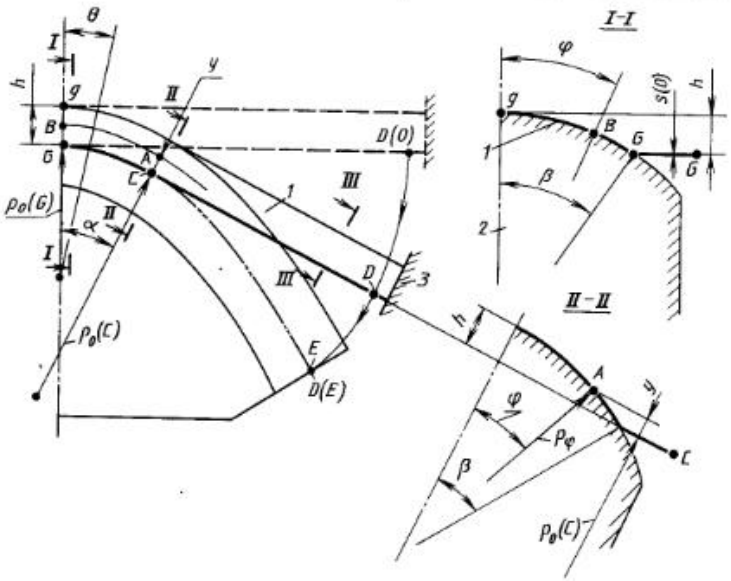


Рис. 12. Схема обтяжки широким листом инструмента с двояковыпуклой поверхностью: *1* — заготовка; *2* — пуансон; *3* — захват

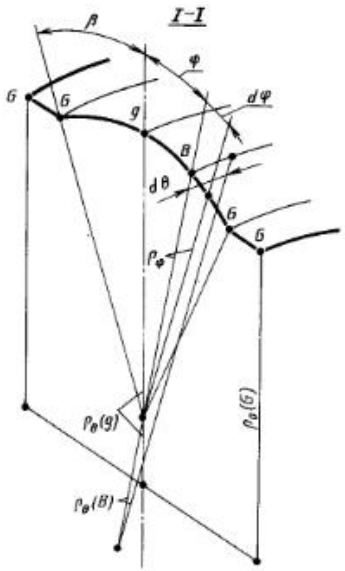


Рис. 13. Сечение оболочки двойной кривизны

ческая оболочка, полученная в предварительной операции гибки широкого плоского листа.

Расчетная схема формоизменения наиболее проста, когда заготовкой является оболочка с цилиндрическим и плоским участками (рис. 12) и при обтяжке по пуансону *2* цилиндрический участок *GgG* заготовки *1* превращается в оболочку двойной кривизны (рис. 13), а плоский участок *GG* в цилиндрическую оболочку, направляющей которых является линия *GE*. В сущности — это схема гибки с растяжением, имеющая место при наматывании заготовки на инструмент. Захват *3* движется относительно пуансона *2* так, что материальная точка *D* заготовки, расположенная вблизи захвата, движется по эвольвенте *D* (0) *E*, построенной по отношению к направляющей *GE*, поэтому длины *GD* (0) = = *GE*. Пластической деформацией охватывается только область, расположенная около сечения *II—II*, отделяющего намотанную на пуансон часть заготовки. По мере прохождения материального сечения через эту область деформация в нем нарастает до

$$\varepsilon_1 = \ln (1 + y/\rho_0) \qquad (10)$$

и остается такой во всех сечениях намотанной части. Для заданной поверхноети пуансона координата y является определенной функцией φ. В частности, при $\rho_\varphi = \text{const}$ для схемы, показанной на рис. 13,

$$y = \rho_\varphi (\cos\varphi - \cos\beta). \qquad (11$$

Толщина стенки вдоль gG

$$s = s(0)/(1 + y/\rho_0), \qquad (12)$$

а вдоль GG $s = s(0)$.

Рассмотренная расчетная схема применима только в случае, когда соотношение между отрезками gG и GG отвечает требованию, чтобы в ненамотанной еще на пуансон части заготовки не возникала пластическая деформация, т. е. чтобы

$$P/F(0) < \sigma_т, \qquad (13)$$

где

$$P = \int_0^\beta \frac{4}{\sqrt{3}} As(0) \left(\varepsilon_0 + \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_1\right)^n \times$$

$$\times e^{-\varepsilon_1 \rho_\varphi} d\varphi \qquad (14)$$

— сила растяжения, необходимая для пластической деформации в области, расположенной около сечения *II—II*; $F(0)$ — площадь сечения заготовки в сечении *III—III*; $\sigma_т$ — предел текучестн материала заготовки. Отношение GG/gG, отвечающее (13), тем больше, чем больше значения h/gG и h/ρ_0.

Если в сечении заданной детали отрезок GG недостаточен или равен нулю, для того чтобы удовлетворялось неравенство (13), вводят соответствующий технологический прнпуск. Это всегда можно сделать для деталей с двояковыпуклой поверхностью (см. рис. 12).

Причем, когда в сечении детали отрезок GG равеи нулю, прнпуск может быть взят в виде продолжения отрезка gG. Тогда эвольвента D (0) F строится по отношению к неизменяющей длину кривой GE, представляющей теперь линию обрезки прнпуска, т. е. кромку детали. Деформация ε_1 и напряжение σ_1 для частиц металла, расположенных с выпуклой стороны от кривой GE, — положительные, а для частиц, расположенных с вогнутой стороны, — отрицательные. Поэтому поле такого прнпуска теряет устойчивость и становится волнообразным.

При обтяжке по схеме, показанной на рис. 12, формоизменение ограничено появлением локализации деформации в наиболее растянутых продольных волокнах. Деформация (10) имеет наибольшее значение для волокна с координатой $y = h$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(h) = \ln (1 + h/\rho_0)$. Значение $\varepsilon_1(h)$, прн котором появляется локализация, больше значения (8), относящегося к процессу обтяжки инструмента с цилиндрической поверхностью. Градиент деформации ε_1, взятый по направлению gG, существенно влияет на развитне локализации растяжения и приводит к ее запаздыванию. Это влияние отражено в табл. 5. В ней градиент деформации представлен приближенно отношением $(h)/gG$.

Если неравенство (13) не выполняется, то пластнческой деформацией охватывается вся заготовка, тогда в расчетной схеме (см. рис. 12) должна быть принята другая траектория движения захватов, уходящая дальше от плоскости симметрии *I—I*, чем эвольвента D (0) E. В каждое данное мгновение обтяжки деформация ε_1 на участке CD заготовкн распределена равномерно как в поперечных сечениях, так и вдоль CD, а на участке GC — неравномерно и в поперечном сечении — по углу φ, и вдоль GC — по углу θ. В приближенных технологических расчетах принимают, что закономерность изменения деформации по θ отвечает закономерности

$$P(\theta) = P(C) \exp[-\mu_\chi (\alpha - \theta)].$$

В этой формуле $\mu_\chi = \chi\mu$, где χ — коэффициент, отражающий влияние кривизны $1/\rho_\varphi$ на контактное давление и силу трения.

5. Значения деформации $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1д}$, превышение которой приводит к локализации растяжения продольных волокон заготовки при обтяжке по схеме, изображенной на рис. 12

n	$\varepsilon_1 (h)/gG$										
	0,0005	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010
0,15	0,212	0,228	0,250	0,267	0,279	0,290	0,300	0,308	0,316	0,323	0,330
0,20	0,236	0,253	0,274	0,281	0,303	0,314	0,324	0,333	0,340	0,347	0,354
0,25	0,289	0,305	0,324	0,340	0,353	0,364	0,375	0,383	0,391	0,398	0,403
0,30	0,338	0,355	0,375	0,390	0,404	0,415	0,424	0,433	0,442	0,449	0,455

n	$\varepsilon_1 (h)/gG$									
	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020
0,15	0,335	0,339	0,343	0,346	0,349	0,352	0,353	0,355	0,356	0,357
0,20	0,359	0,364	0,367	0,370	0,373	0,376	0,377	0,378	0,378	0,379
0,25	0,408	0,413	0,417	0,420	0,424	0,425	0,426	0,427	0,428	0,429
0,30	0,460	0,463	0,467	0,480	0,483	0,485	0,486	0,487	0,488	0,489

Силы

$$P(\theta) = \int_0^{\beta} \frac{4}{\sqrt{3}} As(0) \times$$

$$\times \left[\varepsilon_0 + \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_1(\theta, \varphi)\right]^n e^{-\varepsilon_1(\theta,\varphi)} \times$$

$$\times \rho_\varphi d\varphi + 4As(0) B_G \times$$

$$\times [\varepsilon_0 + 2\varepsilon_1(\theta, \beta)/\sqrt{3}]^n/[\sqrt{3} \times$$

$$\times \exp \varepsilon_1(\theta, \beta)]; \quad (15)$$

$$P(C) = 2As(0) B(0) \times [\varepsilon_0 +$$

$$+ 2\varepsilon_1(C)/\sqrt{3}]^n/[\sqrt{3} \exp \varepsilon_1(C)], \quad (16)$$

где $B_G = GG$; $B(0) = gGG$ (см. рис. 13).

Деформация $\varepsilon_1(C)$ связана с деформацией $\varepsilon_1(\theta, \beta)$ следующим равенством:

$$\int_0^{\beta} \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\varepsilon_0 + \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_1(\theta, \varphi)\right]^n \times$$

$$\times e^{-\varepsilon_1(\theta,\varphi)} \rho_\varphi d\varphi + 2B_G \times$$

$$\times \left[\varepsilon_0 + \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_1(C)\right]^n \Big/ |\sqrt{3} \times$$

$$\times \exp \varepsilon_1(\theta, \beta)] = 2B(0) [\varepsilon_0 +$$

$$+ 2\varepsilon_1(C)/\sqrt{3}]^n/\{\sqrt{3} \exp [\mu_\chi(\alpha - \theta) +$$

$$+ \varepsilon_1(C)]\}. \quad (17)$$

По достижении деформацией $\varepsilon_1(C)$ значения $\varepsilon_{1ш}$ (8) возникает локализация деформации на участке CD заготовки, ограничивающая формоизменение. Поэтому при невыполнении неравенства (13) возможности формоизменения значительно снижаются.

Последовательность формоизменения заготовки при обтяжке инструмента с двояковыпуклой поверхностью относительно малой кривизны и когда углы α и β не превышают 10—15 °, показана на рис. 14. Изогнутый в цилиндрическую оболочку лист зажимают в захватах. При соответствующем устройстве захваты используют и для изгиба зажатого вначале плоского листа (рис. 14, *а*). Задают движение наматывания оболочки (без ее растяжения) на пуансон, в котором каждый захват движется относительно пуансона по эвольвенте $D(0)E$, относящейся к линии gE касания двояковыпуклой поверхности пуансона с воображаемой цилиндрической поверхностью, направляющей которой является эта линия (рис. 14, *б*). Траекторией движения захвата может быть и другая линия, проходящая ближе к плоскости симметрии пуансона, чем эвольвента $D(0)E$, и имеющая ту же конечную точку E. В этом движении цилиндрическая оболочка первоначально принимает более сложную форму за счет упругой или малой упругопластической деформации металла. Части оболочки, расположенные с одной и другой стороны от линии gE, обычно становятся волнообразными. Вслед за движением наматывания задают движение обтяжки (рис. 14, *в*). Траекторией движения точки D обычно является прямая $D(1)D(2)$, касательная к линии gE в точке E.

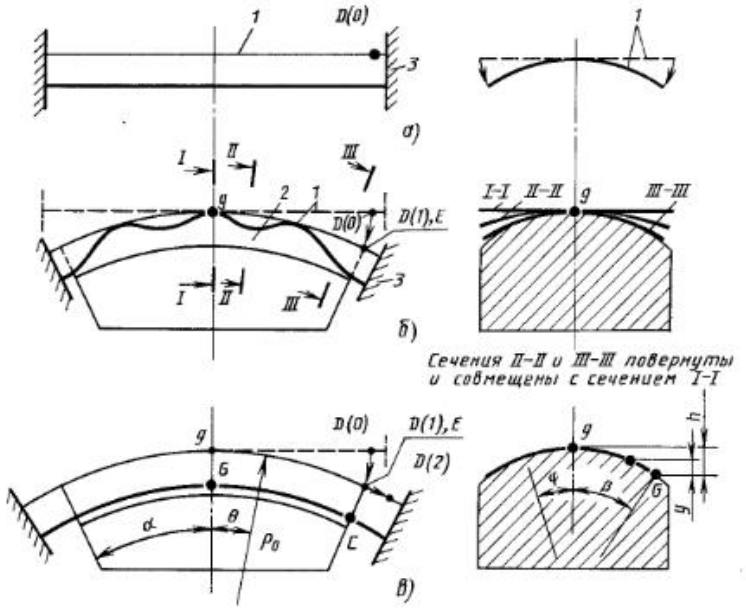


Рис. 14. Последовательность обтяжки инструмента с двояковыпуклой поверхностью:
а — гибка листа в цилиндрическую оболочку; *б* — наматывание на пуансон (сечения *II—II* и *III—III* повернуты и совмещены с сечением *I—I*); *в* — обтяжка; *1* — заготовка; *2* — пуансон; *3* — захват

Связь между деформациями в сечениях оболочки, возникающими при обтяжке, приближенно описана равенствами (6) и (17). Силы растяжения определяют по уравнениям (15) и (16), принимая $B_G = 0$. Область полного прилегания оболочки к поверхности пуансона появляется в крайнем сечении, проходящем через точку C, и постепенно распространяется к сечению в плоскости симметрии. Полное прилегание оболочки к пуансону в плоскости симметрии имеет место, когда в этом сечении распределение деформации ε_1 отвечает равенству (10).

Для приближенной оценки наибольшего формоизменения можно пользоваться данными, приведенными в табл. 4, принимая $gD(2)/gD(1) = e_п$ и считая, что угол обтяжки α (см. рис. 10) соответствует углу обтяжки α, показанному на рис. 14, *в*. Оболочка двойной кривизны заданной формы может быть получена, если значение

деформации ε_1 (см. табл. 4), относящейся к точке G цилиндрической оболочки (см. рис. 10), больше деформации ε_1 (h) в точке g заданной оболочки (см рис. 14, *в*), найденной по формуле (10).

Пуансон *2* (рис. 14, *б*, *в*) можно рассматривать как одну секцию многосекционного пуансона, предназначенного для формоизменения замкнутой кольцевой цилиндрической оболочки. Методика расчета технологических параметров такая же, как для цилиндрической оболочки.

Обтяжку осуществляют в штампах на листоштамповочных прессах, а также на специальных обтяжных машинах.

При обтяжке в штампах кромки листа жестко зажимают с помощью прижимных устройств. Для полного устранения проскальзывания на кромке листа обычно выполняют формовку рифта V- или П-образного сечения; высоту сечения принимают равной $(7 \div 10)\ s\ (0)$. Усилие (на единицу длины рифта), необходимое для формовки рифта и для удержания кромки в прижимном устройстве, приближенно можно найти по формуле

$$P = (1{,}5 \div 1{,}8)\,\sigma_T s\,(0).$$

Радиусы скруглений углов на контуре сечения рифта подбирают минимальными, исходя из условия недопустимости здесь разрушения металла при его изгибе во время смыкания прижимного устройства и при удержании от проскальзывания зажатой кромки листа во время обтяжки. При изготовлении штампа ребра выступа и впадины на прижимном устройстве не притупляют, а при отладке штампа их доводят до необходимой кривизны.

При обтяжке на специальных обтяжных машинах жесткий зажим кромок листа обеспечивается универсальными зажимами разнообразных конструкций.

3. ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ОБТЯЖКА

Пуансон и матрица жесткие. Заготовка зажимается на матрице прижимом (рис. 15) так, чтобы металл, находящийся за контуром проема, не смещался в проем. Пуансон при движении в матрицу обтягивается образующейся осесимметричной оболочкой. Частицы металла оболочки претерпевают двухосное пластическое растяжение. Оболочка состоит из внеконтактной и двухконтактных зон. В ходе формоизменения внеконтактная зона сокращается, а контактные — расширяются.

Возможность формоизменения оболочки в целом определяется возможностью формоизменения внеконтактной зоны. Она имеет разнонаправленные кривизны в меридианном и окружном

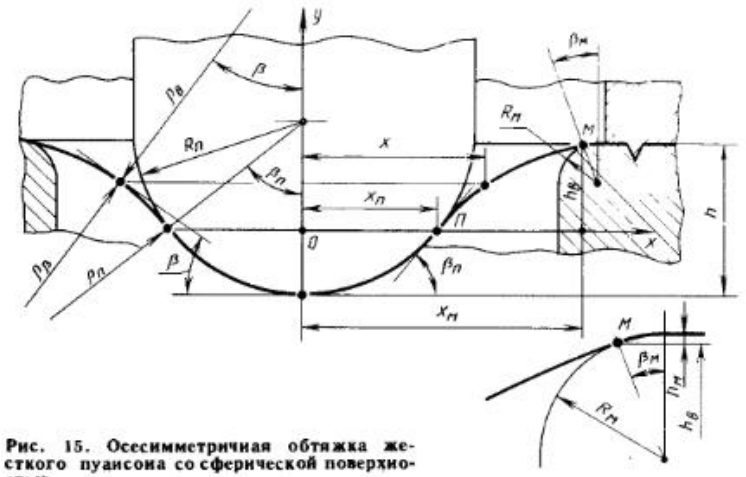


Рис. 15. Осесимметричная обтяжка жесткого пуансона со сферической поверхностью

6. Связь глубины $h_э$ (мм) пробы по Эриксену и предельного угла $\beta^э_{П.п}$, град

$h_э$	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6
$\beta^э_{П.п}$	35,5	36,7	38,0	39,0	40,0	41,0	42,0	43,0	44,0
$h_э$	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4
$\beta^э_{П.п}$	45,1	46,2	47,2	48,2	49,2	50,2	51,3	52,4	53,4
$h_э$	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,8	10,0	10,2
$\beta^э_{П.п}$	54,3	55,2	56,2	57,2	58,2	59,0	60,0	61,0	61,8
$h_э$	10,4	10,6	10,8	11,0	11,2	11,4	11,6	11,8	12,0
$\beta^э_{П.п}$	62,7	63,6	64,5	65,4	66,2	67,0	67,8	68,6	68,5
$h_э$	12,2	12,4	12,6	12,8	13,0	13,2	13,4	13,6	13,8
$\beta^э_{П.п}$	70,2	71,0	71,8	72,6	73,4	75,2	—	—	—

нормальных сечениях соответственно:

$$1/\rho_\beta \approx b/x^2, \quad 1/\rho_\theta \approx -b/x^2. \quad (18)$$

Приближенные уравнения образующей и выражение для толщины стенки имеют вид

$$y \approx b \ln\left[\left(x + \sqrt{x^2 - b^2}\right)\Big/\left(x_П + \sqrt{x_П^2 - b^2}\right)\right]; \quad (19)$$

$$s \approx s\,(0)\,(1 + \cos\beta)^2/4, \quad (20)$$

где

$$b = P_П/[2\pi\sigma_в s\,(0)],\ \beta = \arcsin\,(b/x) \quad (21)$$

($x_П$ — координата точки на границе между зонами).

Параметры формоизменения, определяемые по формулам (19)—(21), относятся к моменту, когда на пуансоне действует заданная сила $P_П$.

Размер оболочки

$$h_в \approx b \ln\left[\left(x_м + \sqrt{x_м^2 - b^2}\right)\Big/\left(x_П + \sqrt{x_П^2 - b^2}\right)\right] \quad (22)$$

или

$$h_в \approx x_П \sin\beta_П \times \ln\left\{\left(x_м + \sqrt{x_м^2 - x_П^2 \sin^2\beta_П}\right)\Big/\left[x_П \times (1 + \cos\beta_П)\right]\right\}, \quad (23)$$

где $x_м$ — координата другой граничной точки образующей; $\beta_П = \arcsin \times (b/x_П)$.

Предельное значение размера $h_в = h_{вП}$ отвечает предельному значению угла $\beta_П = \beta_{П.п}$, при котором возникает локализация деформации и

7. Предельный угол $\beta_{П.\,п}$ (град) для металлов с различным уровнем штампуемости

Уровень штампуемости	$s\,(0)/\rho_П$											
	0,005	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
I	68,5	70,2	72,6	75,2	76	76,7	77,6	78	78,4	78,6	78,9	78,9
II	62	64	66,6	70,2	72,2	73,4	74,6	75,2	75,8	76	77	77,6
III	53,8	55,7	59	63,2	65,8	67	68,3	69,8	70,6	71,5	72,6	73,4
IV	48,8	51	54,6	58,6	61,3	63,6	65,4	67	68,6	69,8	70,6	71,8
V	41,8	44,2	47,8	52,8	56	58,6	61,3	62,8	64,8	66,6	68,2	70,2
VI	37,2	39,9	44	50,2	54,3	57,2	59,6	61,8	63,6	65,2	66,9	68,6
VII	34,8	37,5	42	48,8	52,8	55,8	58	60,4	62,2	64,4	66,2	67,8
VIII	29,5	32,2	36,7	43,6	47,8	50,2	51,8	52,8	53,3	53,8	54,3	54,3

затем разрыв металла в узкой кольцевой области, расположенной в контактной зоне около граничного окружного сечения радиусом $x_П$.

Предельный угол $\beta_{П.\,п}$ зависит от отношения $s\,(0)/\rho_П$ и штампуемости металла при обтяжке. Показателем штампуемости является предельная глубина $h_э$ оболочки, отформованной в технологической пробе металла по Эриксену. Предельный угол $\beta_{П.\,п} = \beta^э_{П.\,п}$ и глубина $h_э$ для оболочки в этой пробе однозначно связаны между собой (табл. 6) и соответствуют отношению $s\,(0)/\rho_П = s\,(0)/10$, когда в пробе используется сферический пуансон радиусом $R_П = 10$ мм.

Для листа из достаточно пластичного металла ($\varepsilon_{р.\,р} > 2n$) толщиной 1 мм предельный угол (град) в пробе по Эриксену

$$\beta^э_{П.\,п} = 55{,}5 + 32{,}7n. \qquad (24)$$

Если угол $\beta^э_{П.\,п}$ известен, значение $\beta_{П.\,п}$, соответствующее отношению $s\,(0)/\rho_П$ для штампуемой оболочки, определяется по табл. 7. В таблице вначале отыскивается столбец под числом, равным или близким числу $0{,}1s\,(0)$. В этом столбце выбирается число, равное или близкое числу $\beta^э_{П.\,п}$, лежащее в строке, положение которой указывает уровень штампуемости заданного металла. Искомое число $\beta_{П.\,п}$ находится в этой строке на пересечении со столбцом под числом $s\,(0)/\rho_П$, близким к заданному отношению.

Одна контактная зона принимает форму заданной поверхности пуансона, другая — тороидной поверхности кромки матрицы. Суммарный размер при сферическом и коническом пуансонах (рис. 15 и 16) соответственно равен:

$$h = R_П\{1 - \cos\beta_П + \sin^2\beta_П \ln[(x_М + \sqrt{x^2_М - R^2_П \sin^4\beta_П})]/[R_П \sin\beta_П \times (1 + \cos\beta_П)]\} + R_М(1 - \cos\beta_М); \qquad (25)$$

$$h = x_п \sin\beta_П \times \ln[(x_М + \sqrt{x^2_М - x^2_П \sin^2\beta_П})/[x_П \times (1 + \cos\beta_П)]] + (x_М - x_П) \times \operatorname{tg}\beta_П + R_М(1 - \cos\beta_М). \qquad (26)$$

При предельном значении угла $\beta_П = \beta_{П.\,п}$ размер $h = h_п$ является также предельным.

Если при формовке сферическим пуансоном соотношение между размерами $R_{П}$ и $x_М$ таково, что в конце формоизменения $x_М = R_{П} \sin\beta_П$, в оболочке остаются только контактные зоны, тогда

$$h_п = (R_М + R_П)(1 - \cos\beta_П). \qquad (27)$$

В этом случае предельный угол $\beta_{П.\,п}$ возрастает по сравнению с найденным по табл. 7 на 5—8 %. Угол $\beta_М = \arcsin(R_{П} \sin^2\beta_П/R_П)$, если оболочка имеет внеконтактную зону, и $\beta_М = \beta_П$ — если остаются только контактные зоны.

Функция (25) при заданных $x_М$ и $\beta_П = \beta_{П.\,п}$ (рад) имеет максимум по $R_{П}$: $h = h_{max}$, когда

$R_{П} = 0{,}77r_М$ при $\beta_{П.\,п} = 1{,}00 \div 1{,}25$;

$R_{П} = 0{,}85r_М$ при $\beta_{П.\,п} = 0{,}75 \div 1{,}00$;

$R_{П} = r_М$ при $\beta_{П.\,п} = 0{,}71$.

Сила обтяжки при наличии контактной и внеконтактной зон

$$P_П = 2\pi\sigma_в s\,(0)\,x_П \sin\beta_П; \qquad (28)$$

когда остается только контактная зона

$$P_П = 2\pi\sigma_в s\,(0)\,x_М \sin\beta_М. \qquad (29)$$

Работа пластической деформации определяется как площадь под кривой $P_П = P_П(h)$. Ее ориентировочно можно оценить по следующей формуле:

$$A \approx 0{,}6P_П h. \qquad (30)$$

Если в конце формоизменения остается только контактная зона для сфери-

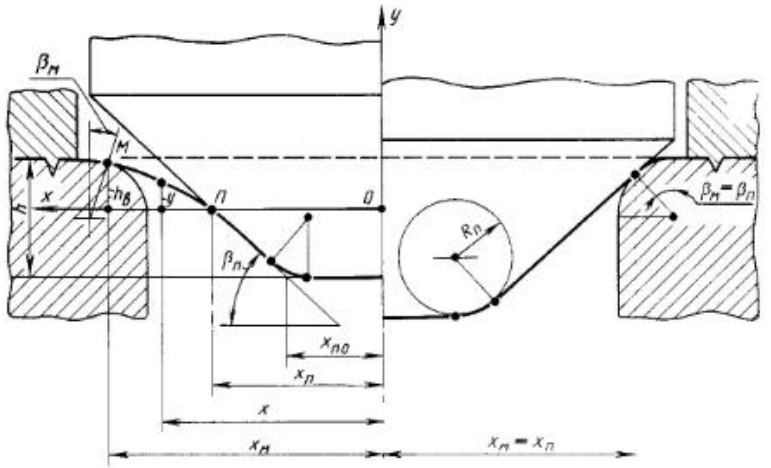


Рис. 16. Осесимметричная обтяжка жесткого пуансона с поверхностью усеченного конуса

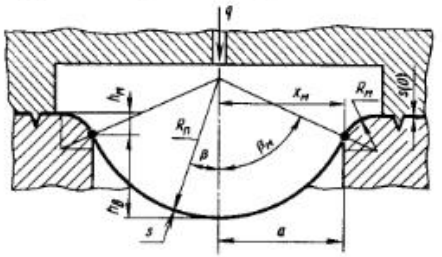


Рис. 17. Осесимметричная обтяжка жидкостного (эластичного) пуансона (матрица — жесткое кольцо)

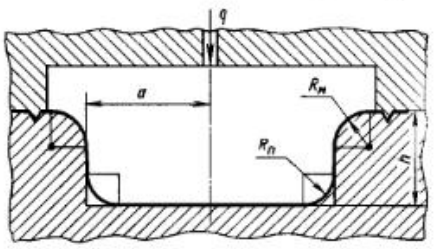


Рис. 18. Осесимметричная обтяжка жидкостного (эластичного) пуансона (матрица — жесткая с плоским дном)

ческого пуансона (см. рис. 15), то

$$A = \pi\sigma_в s(0) h^2; \quad (31)$$

для конического (см. рис. 16)

$$A = \pi\sigma_в s(0)(x_м^2 - x_п^2)(\csc\beta_м - 1). \quad (32)$$

В формулах (31), (32) не учтена работа деформации обтяжки тороидной поверхности матрицы радиусом $R_м$.

Пуансон жидкостный, матрица жесткая. Под действием давления жидкости из плоской заготовки образуется оболочка приблизительно со сферической поверхностью (рис. 17):

$$h_в = x_м \operatorname{tg}(\beta_м/2);$$

$$R_м = x_м/\sin\beta_м = (x_м^2 + h_в^2)/(2h_в). \quad (33)$$

Толщина стенки оболочки

$$s \approx s(0)[(1+\cos\beta_м)/(1+\cos\beta)]^{2k}, \quad (34)$$

где k — коэффициент, зависящий от показателя степенной кривой упрочнения:

n	0,10—0,15	0,15—0,25	0,25—0,35	0,35—0,50
k	0,85	0,80	0,78	0,75

В точке с координатами $x = x_м$, $\beta = \beta_м$, согласно (34), $s = s(0)$. В действительности толщина стенки здесь на 3—5 % меньше исходной. Если $R_м \leqslant 8s(0)$, в области контакта оболочки с тороидной поверхностью матрицы радиусом $R_м$ возникает местное утонение стенки, достигающее 10—15 %. В полюсе оболочки ($x = 0$, $\beta = 0$)

$$s = s(0)[0{,}5(1+\cos\beta_м)]^{2k},$$

$$e_п = |\ln s/s(0)| = 2k\ln[0{,}5(1+\cos\beta_м)]. \quad (35)$$

где $e_п$ — деформация в направлении нормали к поверхности в полюсе оболочки.

Угол $\beta_м$ количественно характеризует формоизменение оболочки. Предельное значение угла $\beta_м = \beta_{мп}$ и предельное формоизменение имеют место при предельном значении деформации $e_п = e_{пп}$. Экспериментально найденная связь между $e_{пп}$, параметрами $e_{1ш}$ и $e_{рр}$ кривой упрочнения металла и параметром $s(0)/a$ имеет следующий вид:

$$|e_{пп}| = 2e_{1ш} + B[s(0)/a]^c, \quad (36)$$

где $B = 0{,}20e_{рр}/(0{,}20^c - 0{,}02^c)$;

$c = 0{,}434\ln[(0{,}9e_{рр} - 2e_{1ш})/(0{,}7e_{рр} - 2e_{1ш})]$; $e_{1ш} = n - e_0$.

Формула (36) применима при $e_{рр} > 3e_{1ш}$, т. е. для достаточно пластичных металлов. Если $e_{пп}$ найдено, предельное значение угла

$$\beta_{мп} = \arccos[2\exp(e_{пп}/2k - 1)]. \quad (37)$$

Давление жидкости

$$q \approx 2\sigma_в s(0)/R_п = 4h_в\sigma_в s(0)/(h_в^2 + x_м^2). \quad (38)$$

Работа пластической деформации

$$A \approx \pi\sigma_в s(0) h_в^2. \quad (39)$$

Если матрица имеет дно (рис. 18), ее глубина h должна быть меньше предельного размера оболочки, найденного по формуле (33) при подстановке в нее $\beta_м = \beta_{мп}$ (37), на 10—15 %

Необходимое давление жидкости

$$q \approx \sigma_в s(0)(a + R_п)/(aR_п). \quad (40)$$

Глава 9 ОТБОРТОВКА

Формоизменение заготовки. Формообразование борта вокруг отверстия показано на рис. 1. Часть *3* заготовки, ограниченная контурами диаметром $D_м$ и $d(0)$, под действием пуансона *1* превращается в борт.

При формоизменении заготовки воображаемое малое волокно $\Delta l_п$ (см. рис. 1), исходящее из какой-либо точки A, взятой на образующей срединной поверхности заготовки, укорачивается. Скорость его деформации $\dot{e}_п < 0$, толщина борта соответственно уменьшается. Волокно Δl_θ удлиняется ($\dot{e}_\theta > 0$), диаметральные размеры кольцевых элементов заготовки, находящиеся под торцом пуансона, увеличиваются. Изменение длин волокон $\Delta l_п$ и Δl_θ при указанных знаках скоростей деформаций происходит в течение всего процесса отбортовки, независимо от того, в каком месте образующей пластически деформируемого участка заготовки находится точка A.

Изменение длины волокна Δl_ρ зависит от положения точки A на образующей и от того, насколько расширилось отверстие, имеющее начальный контур $d(0)$. В точке, находящейся у кромки отверстия, волокно Δl_ρ укорачивается ($\dot{e}_\rho > 0$), а в точке, находящейся вдали от кромки, там, где радиальные растягивающие напряжения σ_θ превышают половину тангенциальных растягивающих напряжений σ_θ, оно удлиняется ($\dot{e}_\rho > 0$).

Напряжение σ_ρ изменяется вдоль образующей заготовки от нуля — на кромке отверстия, до наибольшего значения $\sigma_{\rho 0}$ — в сечении *1—1* (см. рис. 1). При $r - r(0) > r_п$

$$\sigma_{\rho 0} = \left\{\frac{\sigma_в}{1-\psi_ш}\times\left[\frac{a}{\psi_ш(2r(0)+a)}\right]^{\frac{\psi_ш}{1-\psi_ш}}\times\right.$$

$$\left.\times\left(1 - \frac{r(0)+a}{r} + \frac{\sigma_т s(0)}{2r_п + s(0)}\right)\right\}\times$$

$$\times(1 + 1{,}6\mu), \quad (1)$$

где $a = 0{,}57\ [r_м + r_п + s(0)]$.

При отбортовке коническим пуансоном

$$\sigma_{\rho 0} = 0{,}5\sigma_в\left[\left(1 - \frac{r(0)}{r}\right)\sin\beta + (1-\sin\beta)\ln\frac{r}{r(0)}\times\right.$$

$$\times(\sin\beta + \mu\cos\beta)\times$$

$$\left.\times\left(1 + \sqrt{\frac{r(0)}{r - [r - r(0)]\sin\beta}}\right)\right], \quad (2)$$

где $\sigma_в$ — временное сопротивление; $\psi_ш$ — относительное сужение поперечного сечения образца при растяжении в момент образования шейки; $\sigma_т$ — предел текучести; μ — коэффициент трения; β — угол конусности пуансона.

Приближенно, независимо от формы пуансона,

$$\sigma_{\rho 0} \approx \sigma_в(d - d(0))/d. \quad (3)$$

Предельный коэффициент отбортовки. Формообразование заготовки при отбортовке оценивается коэффициентом отбортовки

$$K(t) = d(t)/d(0). \quad (4)$$

При полной отбортовке $d(t) = d$ (см. рис. 1, *а*) и коэффициенте отбортовки $K = d/d(0)$ формоизменение ограничивается разрывом металла по кромке борта, возникающем при $K(t) = K_п(t)$ или при $K = K_п$.

На предельное формоизменение существенно влияет отношение $s(0)/d$ и состояние металла в приповерхностном слое. На рис. 2 показаны кривые

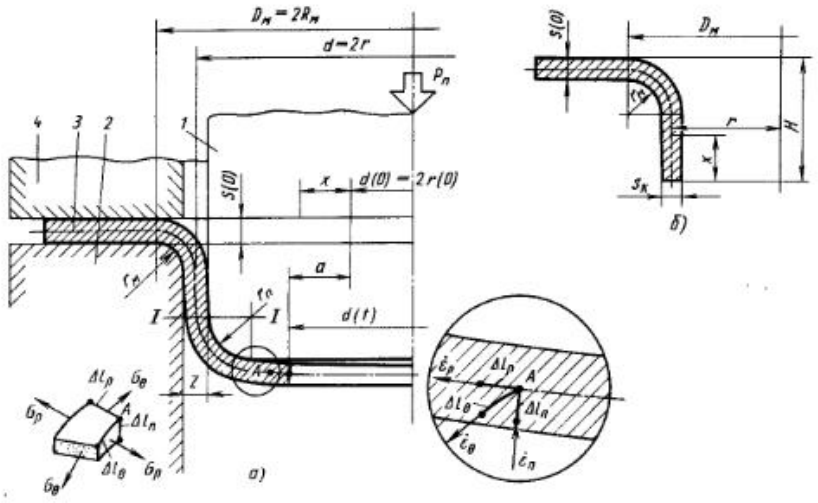


Рис. 1. Схема процесса отбортовки (*а*); форма горловины (*б*)

$K_п$ $[s(0)/d]$ для различных форм рабочей поверхности пуансона и состояний приповерхностного слоя. В табл. 1—3 приведены предельные коэффициенты отбортовки для легированных сталей и некоторых цветных металлов и сплавов на их основе.

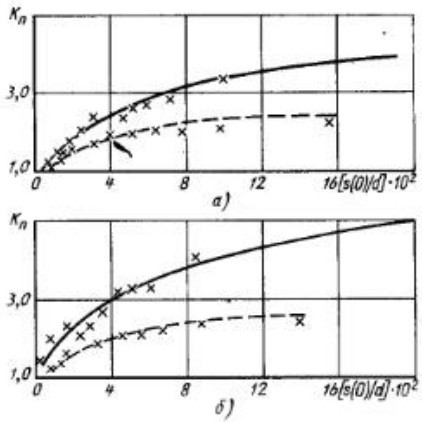


Рис. 2. Зависимости коэффициента отбортовки $K_п$ от отношения $s(0)/d$ для низкоуглеродистой стали:
а — при отбортовке цилиндрическим пуансоном с плоским торцом; *б* — при отбортовке сферическим пуансоном (штриховые линии — отверстие получено пробивкой в штампе; сплошные — отверстие получено сверлением с зачисткой заусенцев)

В расчетах предельной высоты борта коэффициент отбортовки принимают на 10—15 % меньше предельного значения.

При отбортовке толстолистовых заготовок с технологическим отверстием, полученным пробивкой, значение $K_п$ зависит от того, к какому инструменту обращена поверхность скола. Если она обращена к пуансону, вероятность появления трещин меньше.

Отбортовка кольцевых заготовок. Когда отношение $D(0)/d$ кольцевой заготовки близко к значению предельного коэффициента вытяжки, возможны различные варианты формоизменения (рис 3): область *I* — вытяжка стакана диаметром d при неизменном диаметре отверстия ($d(t) = d(0)$); область *II* — вытяжка стакана диаметром d, сопровождающаяся увеличением диаметра отверстия $d(t) > d(0)$; область *III* — образование борта диаметром d, сопровождающееся уменьшением диаметра внешнего контура заготовки $D < D(0)$; область *IV* — образование борта диаметром d при неизменном диаметре внешнего контура $D = D(0)$. В зоне *А* возможно разрушение заготовки в виде трещин

1. Предельные коэффициенты $K_п$ отбортовки для некоторых материалов

Материал	$[s(0)/d]\,10^2$								
	2	3	5	8	10	12	15	20	30
Сталь:									
12Х18Н10Т; 15Х18Н12С4Т	1,53	2,08	2,38	2,50	2,50	2,50	2,63	2,72	2,72
10; 20	1,19	1,58	1,85	1,92	1,92	1,92	2,00	2,08	2,12
Сплавы:									
Д16М; В95М; АМг6	1,33	1,42	1,47	1,58	1,58	1,57	1,57	1,57	1,57

и отрыва дна; в зоне *Б* — штамповка без разрушения. Отбортовка при $D = D(0)$ возможна только в области *V*. Если и для других областей необходимо сохранить неизменным диаметр внешнего контура заготовки, процесс отбортовки ведут с жестким прижимом (защемлением) фланца.

Расчет геометрических параметров заготовки и инструмента. Толщина металла изменяется вдоль образующей борта от $s = s(0)$ — в зоне сопряжения

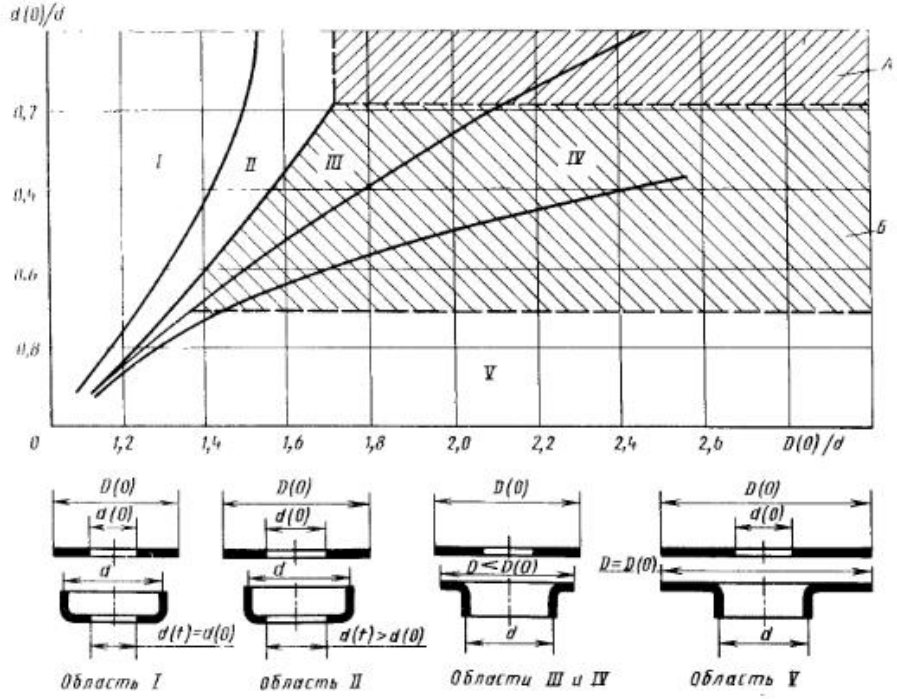


Рис. 3. Возможное формоизменение при штамповке плоских кольцевых заготовок из низкоуглеродистой стали при $d = 100$ $s(0)$

2. Предельные коэффициенты $K_п$ отбортовки для титановых сплавов

Материал	$[s(0)/d]\,10^2$			
	0,3—0,7	0,8—1,5	1,6—3,0	Св. 3,0
	В холодном состоянии			
ВТ1—00, ВТ1—0	1,4—1,7	1,75—1,8	1,5—1,7	1,5
ОТ4—0	1,4—1,65	1,7—1,75	1,5—1,6	1,5
ОТ4—1	1,35—1,5	1,6—1,7	1,45—1,55	1,4
ОТ4	1,3—1,4	1,5—1,6	1,35—1,5	1,35
ВТ4	1,2—1,3	1,4—1,5	1,3—1,4	1,3
ВТ5—1	1,2—1,3	1,4—1,5	1,2—1,3	—
ВТ14:				
отожженный	—	1,4—1,5	1,3—1,4	—
закаленный	—	1,5—1,6	1,4—1,5	—
ВТ16:				
отожженный	—	1,4—1,5	1,3—1,4	—
закаленный	—	1,5—1,6	1,4—1,5	—
ВТ20	—	1,25—1,35	1,2—1,3	—
ВТ22:				
отожженный	—	1,5—1,6	1,6—1,7	—
закаленный	—	1,4—1,5	1,5—1,6	—
Материал	$[s(0)/d]\,10^2$			
	0,3—0,7	0,6—1,5	1,6—3,0	Св. 3,0
	В горячем состоянии			
ВТ1—00, ВТ1—0	1,6—1,75	1,8	1,6—1,8	1,6
ОТ4—0	1,6—1,75	1,8	1,6—1,8	1,6
ОТ4—1	1,6—1,75	1,8	1,6—1,8	1,6
ОТ4	1,5—1,7	1,75—1,9	1,6—1,75	1,5
ВТ4	1,45—1,65	1,7—1,8	1,5—1,65	1,5
ВТ5—1	1,4—1,6	1,7—1,75	1,5—1,6	1,45
ВТ14:				
отожженный	—	1,6—1,7	1,4—1,6	1,4
закаленный	—	—	—	—
ВТ15:				
отожженный	—	1,6—1,7	1,4—1,6	1,4
закаленный	—	—	—	—
ВТ20	—	1,5—1,6	1,6—1,7	—
ВТ23:				
отожженный	—	1,7—1,8	1,8—1,9	—
закаленный	—	—	—	—

3. Предельные коэффициенты отбортовки для листового проката толщиной до 6 мм при $[s(0)/d]\,10^2 \approx 2$

Материал	$K_п$	Материал	$K_п$
Стали и сплавы на никелевой и хромоникелевой основе	1,65—1,75	АК6 (закаленный и искусственно состаренный)	1,22—1,25
Алюминиевые сплавы:		АК8 (отожженный и свежезакаленный)	1,40—1,45
мягкие (отожженные и закаленные)	1,35—1,60	АК8 (закаленный и искусственно состаренный)	1,22—1,25
нагартованные на 5—25 % (из мягкой заготовки)	1,15—1,55	Магниевые сплавы:	
закаленные и состаренные	1,25—1,35	МЛ1 (нагрев до 320—350° С)	2,38—2,78
закаленные, естественно состаренные, нагартованные на 10 % и искусственно состаренные	1,20—1,30	МА8 (нагрев до 300—375° С)	2,50—2,94
		Медь и ее сплавы:	
		М0б $[s(0)/d]\,10^2 = 2 \div 5$	1,34—1,78
АМг1М	1,70	М0	1,39—1,88
АМг1П	1,62	М1	2,23—2,78
АМг1Н	1,45	Л63	1,48—1,64
АМг2М	1,62	Бронза в отожженном состоянии:	
АМг2П	1,43	Бр. ОФ6,5-0,15	1,40—1,50
АМг2Н	1,40	Бр ОЦ4-3	1,35—1,45
Д20 (отожженный и закаленный)	1,39—1,44	Бр. ОЦ4-2,5	1,30—1,45
Д20 (закаленный и искусственно состаренный)	1,29—1,35	Бр. КМц3-1	1,40—1,50
		Бр. АМц9-2	1,30—1,40
ММ (отожженный и закаленный)	1,35	Бр. А5	1,40—1,50
ММ (закаленный и искусственно состаренный)	1,25	Бр. Б2	1,35—1,45
АК6 (отожженный и закаленный)	1,42—1,46		

Примечание. Значения $K_п$ приведены для случаев, когда технологическое отверстие получено обработкой резанием. Если отверстие получено пробивкой, табличное значение $K_п$ следует уменьшить на 10—15%.

с фланцем до $s = s_к$ — на кромке борта. Формула для приближенного определения распределения толщины вдоль образующей имеет следующий вид:

$$s_x = s(0)\{[r(0) + x]/r\}^{[r(0)+2x]/[2r(0)+x]} \quad (5)$$

(обозначения параметров — см. на рис. 1). На кромке борта она равна $x = 0$,

$$s_н = s(0)\,[r(0)/r]^{1/2}. \quad (6)$$

При определении диаметра отверстия принимают, что длина образующей

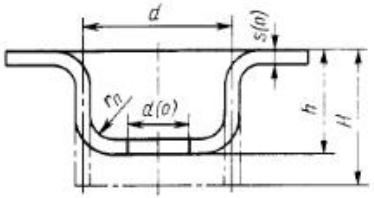


Рис. 4. Схема получения высокой горловины вытяжкой с последующей пробивкой дна и отбортовкой

борта при его формообразовании остается неизменной, тогда

$$d(0) = D_м - 2H - 1{,}14r_м + 0{,}43s(0); \quad (7)$$

высота борта

$$H = (KD_м - d)/2K - 0{,}57r_м + 0{,}21s(0). \quad (8)$$

Если требуемая высота борта больше, чем найденная по формуле (8) при $K = K_п$, может быть введена предварительная вытяжка полуфабриката диаметром d (рис. 4) высотой

$$h = H - (1 - K_п)\,d/2K_п + 0{,}43r_п + 0{,}71s(0), \quad (9)$$

причем

$$d(0) = d + 2h - 2H - 0{,}43r_п - 0{,}71s(0).$$

Зазор z между матрицей и пуансоном принимают на 10—20 % больше толщины $s(0)$ заготовки. Радиус $r_м$ кривизны рабочей кромки матрицы берут согласно чертежу детали. Радиус кривизны кромки пуансона определяют из формулы $r_п > [d - d(0)]/2$ при $d(t) = d$ (полная отбортовка). Если же $d(t) < d$, значение $r_п$ назначают согласно чертежу детали; $r_п \geqslant 5s(0)$.

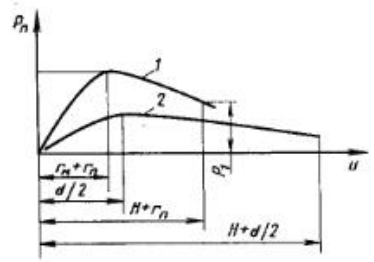


Рис. 5. График изменения усилия по пути при отбортовке пуансоном с плоским торцом (*1*) и конусным пуансоном (*2*)

5. Расчет силовых параметров. Усилие, на пуансоне, необходимое для отбортовки;

$$P_п = \pi d s(0)\,\sigma_{ρ0}, \quad (10)$$

где $\sigma_{ρ0}$ — напряжение в сечении I—I (см. рис. 1), которое определяют по формулам (1) и (2).

Если напряжение $\sigma_{ρ0}$ определяют по формуле (3), формула (10) принимает следующий вид:

$$P_п = \pi d\,(1 - 1/K)\,s(0)\,\sigma_в. \quad (11)$$

Характер изменения усилия $P_п$ по перемещению u пуансона отражен на рис. 5.

Работу деформации приближенно можно определить по следующим формулам:

при отбортовке по схеме, показанной на рис. 1,

$$A = 0{,}5\,[(r_м + r_п)\,P_п + (P_п + P_1)\,(H - r_м)]; \quad (12)$$

при отбортовке конусным пуансоном

$$A = 0{,}5\,[0{,}5\,dP_п + (P_п + P_1)\,H], \quad (13)$$

где $P_1 = (0{,}7 \div 0{,}8)\,P_п$.

Отбортовка некруглых отверстий. При отбортовке отверстий некруглой формы на плоской листовой заготовке коэффициент отбортовки представляет собой отношение радиуса r_i кривизны i-го участка контура горловины к соответствующему радиусу $r_i(0)$ кривизны контура отверстия: $K_i = r_i/r_i(0)$. Предельное значение коэффициента отбортовки определяют с помощью табл. 1—3, причем, если вогнутый участок контура радиуса r_i сопрягается с выпуклым участком (рис. 7, участки *2* и *3*), предельный коэффициент может быть принят на 10—20 % больше значения, приведенного в этих таблицах.

Для определения контура отверстия контур горловины разделяют на прямолинейные и криволинейные участки. Радиусы кривизны контура на вогнутых участках *2*, *4*, *6* и *8* (см. рис. 7) вычисляют по формуле (7), полагая $d(0) = d_i(0) = 2r_i(0)$; $D_м = D_{мi} = 2R_{мi}$ (см. рис. 1). Причем высоту H борта находят по формуле (8), принимая $d = d_i = 2r_i$ и $K = K_п$ для того участка, на котором радиус r_i наименьший. Прямолинейные участки *1* и *5* контура отверстия сопрягают с дугами радиусов r_i. Радиус $r_i(0)$ на выпуклом участке *3* определяют как радиус заготовки при вытяжке по условию постоянства площади поверхности. После построения контура отверстия на отдельных участках сглаживают ступеньки на стыках с дугой третьего участка.

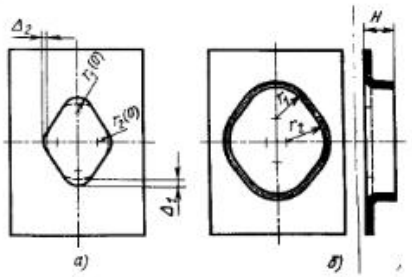


Рис. 6. Отбортовка некруглого отверстия: *а* — контур отверстия; *б* — контур борта

Рассмотренное приближенное построение контура отверстия не обеспечивает строгого постоянства высоты H борта вдоль горловины. Форму контура отверстия обычно корректируют при отладке операции. На участках большой кривизны контур несколько смещают. Смещение Δ_i (см. рис. 6) тем больше, чем больше кривизна. Корректируют также кривизну рабочих кромок инструмента. Увеличение радиуса $r_м$ и уменьшение радиуса $r_п$ приводит к увеличению H.

Отбортовка отверстий на трубчатых заготовках. При получении горловин на трубчатых заготовках отверстие под отбортовку выполняют овальной формы. Большую ось овала направляют вдоль оси заготовки. Коэффициент отбортовки определяют по формуле: $K = d/b$, где b — меньшая ось

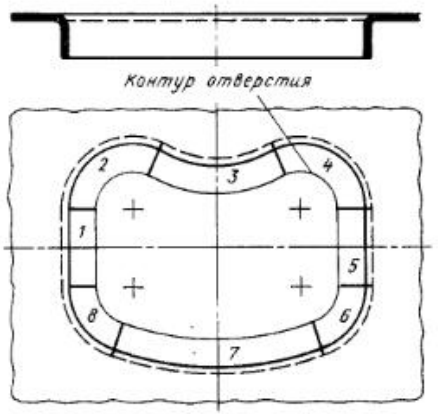


Рис. 7. Отбортовка отверстия сложной формы

овала (рис. 8). Предельный коэффициент отбортовки овального отверстия приближенно может быть принят равным предельному коэффициенту отбортовки круглого отверстия диаметром $d(0) = b$.

Большую ось a отверстия определяют по формуле (7), принимая $a = d(0)$, $H = H_a$, а малую ось b — по следующей формуле (рис. 8):

$$b = (D_в + s)\cos\left\{\frac{1}{D_в + s}\,[D_в + 2(s + r_н)] \times \arccos\frac{d_в + 2(s + r_н)}{D_в + 2(s + r_н)} - 2H_в\right\}. \quad (14)$$

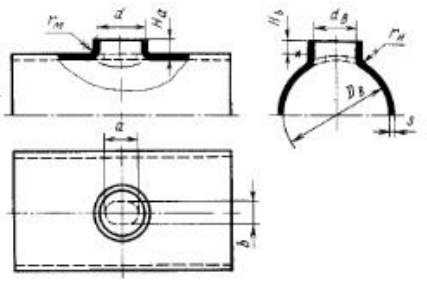


Рис. 8. Горловина, полученная на трубчатой заготовке

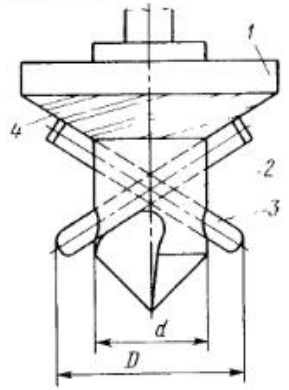


Рис. 9. Инструмент для сверления технологического отверстия и отбортовки развальцовкой

Горловины на трубах большой длины (в том числе горловины диаметром до 500 мм на трубах диаметром до 1 м) можно получить развальцовкой технологического отверстия в стенке трубы, полученного фрезерованием или сверлением. Указанные операции выполняют на специальных станках моделей Т30÷Т500 (Финляндия), оснащенных комбинированным, легко переналаживаемым инструментом (рис. 9), состоящим из корпуса *1*, сверла *2*, двух пальцев *3* для развальцовки и регулирующего конуса с винтовой нарезкой *4*. Последовательность изготовления горловины показана на рис. 10. При опускании вращающегося инструмента (рис. 10, *а*) происходит сверление технологического отверстия;

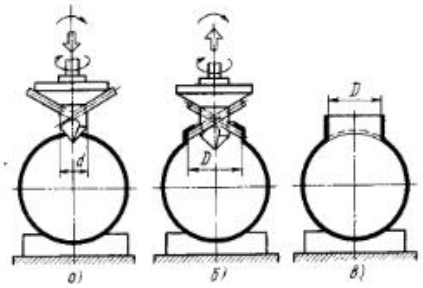


Рис. 10. Последовательность изготовления горловины на трубе развальцовкой (способ «Т-дрилл»)

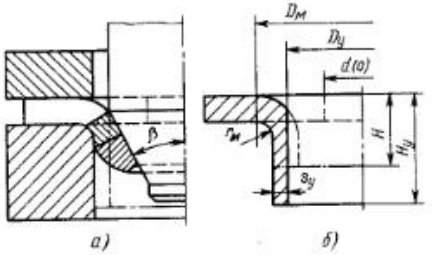


Рис. 11. Схема процесса отбортовки с утонением стенки

при этом пальцы втянуты регулирующим конусом в верхнее положение так, чтобы их торцы не выходили из корпуса. После окончания сверления конус перемещается дальше внутрь трубы, затем выходит из корпуса. С помощью регулирующего конуса выдвигаются пальцы и настраиваются на развальцовку горловины требуемого диаметра D. После этого инструмент перемещается вверх, пальцы для развальцовки контактируют с трубой и постепенно развальцовывают горловину (рис. 10, *б*), а затем выходят из нее (рис. 10, *в*). В течение всего процесса отбортовки труба закреплена на столе станка. Время обработки зависит от диаметра горловины, толщины ее стенки и материала трубы. При диаметре горловины 54 мм время обработки составляет 15—30 с; при диаметре горловины 500 мм — 10—20 мин. При диаметре горловины свыше 100—120 мм фрезерование технологического отверстия и развальцовка производятся раздельно, за две операции.

Рассмотренный способ получения горловины на трубах развальцовкой изнутри на специальных станках запатентован в Финляндии, где он получил название «Т-дрилл».

Отбортовка с утонением. Отбортовку с утонением выполняют, как правило, коническим пуансоном, который, по мере опускания в матрицу, вначале производит отбортовку без утонения, а затем, когда в матрицу войдет его цилиндрическая часть, с утонением (рис. 11, *а*).

Утонение стенки горловины при отбортовке осуществляется при уменьшении зазора между пуансоном и матрицей, который должен быть меньше толщины исходной заготовки. При отбортовке с утонением некоторый объем металла необратимо смещается вдоль образующей борта, увеличивая его высоту (рис. 11, *б*).

При отбортовке с утонением достигается высокая точность (8—10 квалитет) диаметральных размеров горловины. Шероховатость поверхности $Ra = 3{,}2 \div 1{,}6$ мкм. В результате упрочнения металла твердость горловины увеличивается на 30—40 % по сравнению с твердостью исходной заготовки.

Усилие, необходимое для отбортовки с утонением, приближенно определяют по формуле (рис. 11)

$$P_п \approx \pi (D_у + s_у) \times \times \frac{s_у \sigma_в}{1 - \psi_ш} \left(\frac{\psi}{\psi_ш} \right)^{\frac{\psi_ш}{1-\psi_ш}}, \quad (15)$$

где $\psi = [s(0) - s_у]/s(0)$; ψ — относительное сужение поперечного сечения образца при растяжении в момент образования шейки.

Оптимальный угол наклона $\beta_{опт}$ образующей конусного пуансона для отбортовки с утонением, при котором усилие наименьшее, определяют из выражения

$$\cos\beta = 1 - 0{,}5\mu \ln [(2 - \ln s(0)/s_у) \times \times s(0)/s_у], \quad (16)$$

где μ — коэффициент трения.

Высоту горловины приближенно определяют из условия неизменности объема кольцевого участка заготовки, ограниченного диаметрами d (0) и $D_м = D_у + 2s_у + 2r_м$:

$$H_у = \frac{[(D_у + 2s_у)^2 - d^2(0)]}{4s_у (D_у + s_у)} s(0), \quad (17)$$

где $s_у = s(0)/K_у$ — толщина стенки горловины ($K_у$ — коэффициент утонения); $D_у$ — внутренний диаметр горловины.

Допустимое уменьшение толщины стенки горловины, характеризуемое коэффициентом утонения $K_у$, для пластичных металлов составляет 1,7—2,0. Диаметр отверстия $d(0) = d/K_у$, где $d = D_м - 2r_м - s(0)$.

Глава 10 ОБЖИМ И РАЗДАЧА

1. ОБЖИМ

Формоизмеиение заготовки. Под действием продольной внешней силы заготовка перемещается относительно матрицы и по мере продвижения в ее рабочую полость принимает форму оболочки (детали), состоящей из участков: *1*, образованного вращением дуги радиуса $D_2 > R \geqslant D/2$ вокруг оси симметрии детали (рис. 1, *а*); тороидиого *1* и конического *2* (рис. 1, *б*); сферического *1*, тороидиого *2* и цилиндрического *3* (рис. 1, *в*); тороидного *1*, конического *2*, тороидиого *3* и цилиндрического *4* (рис. 1, *г*); участка *1*, образованного вращением дуги радиуса $R > D/2$ вокруг оси симметрии детали, тороидного *2* и плоского донного *3* (рис. 1, *д*). Обжатая часть детали может иметь асимметричную форму, состоящую из участков *1—4* (рис. 1, *е*).

Заготовка для обжима может быть цилиидрической и иецилиндрической формы, кругового и некругового сечения, с дном и без дна. Заготовка с дном обычно обжимается с открытой стороны и реже — с закрытой (рис. 1, *д*).

Матрицы для обжима, как правило, имеют осесимметричную рабочую полость, однако она может быть и асимметричной, например, как показаио на рис. 1, *е*.

Схема внешних и внутренних сил, напряженное состояние. При обжиме иа заготовку действует продольная внешняя сила $P_{пр}$, заталкивающая ее в матрицу. При этом на внешней поверхности заготовки, контактирующей с матрицей и перемещающей относительно иее, возиикают контактные нормальные σ_n и контактные касательные (от сил трения) напряжения $\mu\sigma_n$ (рис. 2).

Внутренняя поверхность заготовки свободиа от напряжений, а контактные иормальные напряжения σ_n при малой относительной толщине стеики ($s/D <$ $< 0{,}02$) значительно меньше напряжения текучести, и его влияние на условие перехода в пластическое состояние и утолщение стеики заготовки незначительно.

В связи с тем, что к заготовке приложена продольная сила $P_{пр}$ и при этом происходнт уменьшеиие поперечных кольцевых элементов заготовки, в зоне пластической деформации возиикают меридианные σ_α и окружные σ_θ внутренние сжимающие напряжения.

Напряжение σ_α изменяется вдоль образующей деформированиого участка детали от иуля в точке K, лежащей на его торце до наибольшего зиачения $\sigma_{\alpha 0}$ в сечении *1—1*.

Окружиые сжимающие напряжения σ_θ вдоль образующей не изменяются; по условию пластичности $\sigma_\theta = -\beta\sigma_s$. Таким образом, напряженное состояние при обжиме близко к плоскому.

Формулы для определения $\sigma_{\alpha 0}$ при обжиме деталей с различной формой деформированиого участка в открытом штампе (без радиального противодавления) приведены в табл. 1.

Предельный коэффициент обжима. Формоизменение при обжиме ограничено явлением локальной потери устойчивости. При определенной (критической) величине продольных и окружных сил сжатия на детали появляются поперечные волны (рис. 3, *а*, *б*), вогиутости (рис. 3, *в*) или продольные волны (рис. 3, *г*).

Вид потери устойчивости зависит в основиом от относительной толщины стеики s/D заготовки, ее материала, условнй закрепления в штампе и формы рабочей полости матрицы для обжима.

Если матрица ие имеет направляющей части (см. рис. 3, *а*), поперечная круговая волиа возникает в зоне переходной поверхности цилиндрического и конического участков детали. При наличии направляющего участка волны появляются у основаиия детали

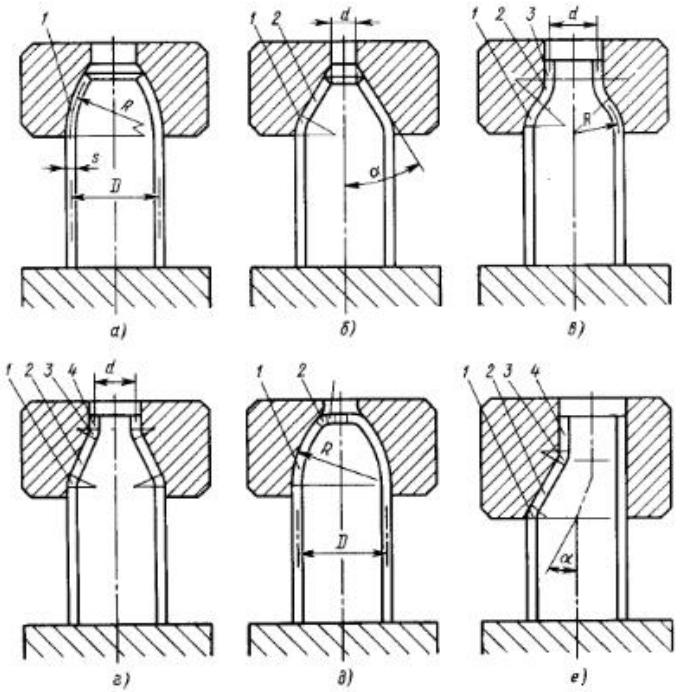


Рис. 1. Схема обжима трубчатых заготовок в матрицах с различной формой рабочей полости

(рис. 3, *б*). Поперечные круговые волны возникают при обжиме относительно толстостенных заготовок, у которых $s/D = 0{,}030 \div 0{,}035$. Вогиутости (прогибы) и продольные волны, направленные вдоль образующей, возникают при обжиме относительно тонкостенных заготовок, у которых $s/D \leqslant$ $\leqslant 0{,}020$. Если $s/D = 0{,}020 \div 0{,}030$, возможна потеря устойчнвости как в виде круговых, так и в виде продольных волн.

При обжиме стальных и алюминиевых заготовок, у которых $s/D < 0{,}015$, появляются продольные волны; при обжиме латунных заготовок возникает прогиб стеики.

Вероятность появления продольных волн возрастает не только с уменьшением s/D, но и с уменьшением сил трения на поверхности коитакта заготовки и рабочей полости матрицы, так как при этом облегчается скольжение заготовки в окружном направлении. При прочих равных условиях появление продольных волн более вероятно при обжиме заготовок в конической матрице по сравнению с купольообразной.

Коэффициент обжима имеет предельное значение $K_п = D/d_{пр}$, когда по мере продвижения заготовки в матрицу и сокращения ее диаметра d до $d_{пр}$ напряжение σ_α (или напряжение σ_θ) достигнет критического значения $\sigma_{кр}$, при котором начинается потеря устойчивости.

Критическое напряжение при обжиме приближенно может быть определено по формуле В. С. Вольмира, полученной им по теории секущего модуля применительно к осевому сжатию относительно коротких цилиндрических замкнутых оболочек за пределами упругости:

$$\sigma_{кр} = \frac{4}{3}\frac{s}{D}E_c,$$

где E_c — секущий модуль, численно равиый тангенсу угла наклона прямой,

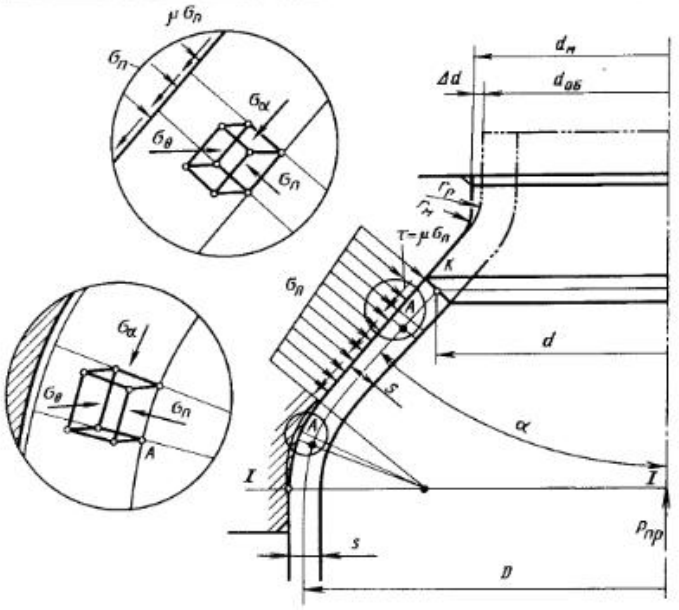


Рис. 2. Схема внешних и внутренних сил при обжиме и напряженное состояние очага пластической деформации:
$d_м$ и $d_{об}$ — диаметры соответственно матрицы и оболочки

соединяющей начало координат с точкой, лежащей на диаграмме растяжения $\sigma(\varepsilon)$. Зная величину $E_c = f(\sigma)$, можно определить соответствующую критическую величину s/D для ряда произвольно взятых точек на диаграмме $\sigma(\varepsilon)$, используя для этого формулу В. С. Вольмира, после чего построить график в плоскости $\sigma_{кр}$, s/D.

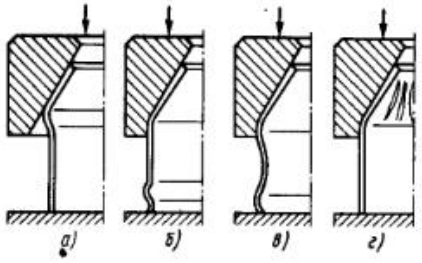
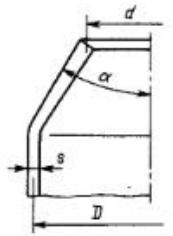
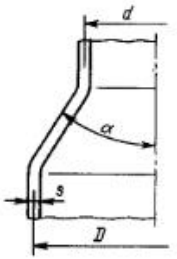
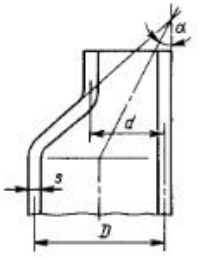
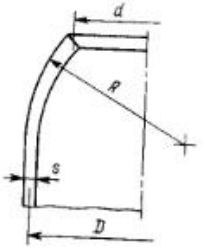


Рис. 3. Виды дефектов, возникающих при потере устойчивости заготовки при обжиме

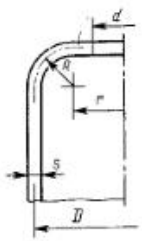
Согласно экспериментальным данным, при осевом сжатии стальных (из стали 40) цилиндрических заготовок с относительной толщиной стенки $s/D = 0{,}06 \div 0{,}08$ $\sigma_{кр} \approx \sigma_т$; с увеличением s/D $\sigma_{кр}$ становится больше, а с уменьшением — меньше $\sigma_т$. При осевом сжатии коротких цилиндрических оболочек ($L/D = 0{,}38 \div 0{,}45$) из сплава АМг6 с относительной толщиной стенки $s/D = 0{,}0027 \div 0{,}027$ и $\sigma_т = 165 \div 172$ МПа А. Г. Пашкевичем и М.Ф. Кашириным установлено, что при $s/D > 0{,}005$ критическая нагрузка несколько превышает предел текучести; с последующим увеличением s/D нагрузка изменяется незначительно (рис. 4).

График зависимости $\sigma_{кр}/\sigma_т$ от D/s при обжиме стальных заготовок в конусных матрицах с различными углами конусности, построенный по результатам экспериментальных данных, показан на рис. 5. Поле графика, расположенное над заштрихованными уча-

1. Формулы для определения $\sigma_{\alpha\theta}$

№ п/п	Эскиз обжатого участка заготовки	Формулы
1		$\sigma_{\alpha\theta} = \sigma_{sc\,p}/2\,(1 + \mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha)\,(1 - d/D) \times (1 + \sqrt{D/d})\,(3 - 2\cos\alpha)$
2		$\sigma_{\alpha\theta} = 0{,}5\sigma_{sc\,p}\{(1 + \mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha)\,(1 - d/D) + \sqrt{s/d}\,\sin\alpha\}\,(1 + \sqrt{D/d})\,(3 - 2\cos\alpha)$
3		$\sigma_{\alpha\theta} = \sigma_s\left[(1 + \mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha)\,(1 - d/D) + \frac{s\,(1 + \mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha)}{2D\sin^2\alpha}\ln\frac{D}{d} + \frac{s}{D} + \frac{s}{d}\right]$
4		$\sigma_{\alpha\theta} = 0{,}5\sigma_{sc\,p}\left\{\frac{1}{D}\left[D - d + 2\mu \times \sqrt{(D-d)\,(4R - D + d)} + \right]\frac{s}{4R}\right\} \times (1 + \sqrt{D/d})$

Продолжение табл. 1

№ п/п	Эскиз обжатого участка заготовки	Формулы
5		$\sigma_{\alpha\theta} = 0{,}5\sigma_{scp}\left[\left(1 + 2\mu \operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2}\right) \times \left(1 - \frac{2r}{D}\right) + 1 - \frac{d}{2r} + \frac{s}{2R}\right] \times (1 + \sqrt{D/d});$ $\alpha = \arccos(D - d)/2R$

Примечание. Среднее напряжение текучести при степенной аппроксимации диаграммы упрочнения вида $\sigma_s = A\varepsilon^n$ определяется по формуле

$$\sigma_{scp} = 0{,}5\left[\sigma_T + \frac{\sigma_в}{n^n}\left(\ln\frac{d}{D}\right)^n \exp n\right],$$

где σ_T — предел текучести; $\sigma_в$ — временное сопротивление разрыву; $n = \ln(1 + \delta_р)$ — показатель деформационного упрочнения; $\delta_р$ — равномерное относительное удлинение при растяжении.

стками, соответствует условиям потери устойчивости.

При обжиме в сферической матрице по схеме, показанной на рис. 1, *в*, предельные коэффициенты обжима $K_п$ определяют по табл. 2 в зависимости от относительной толщины стенки заготовки и ее временного сопротивления разрыву. Данные, приведенные в табл. 2, получены расчетом по формулам, выведенным на базе теории локальных деформаций.

При обжиме по другим схемам (см. рис. 1, *б*, *г*), в связи с изгибом и спрямлением элементов заготовки при переходе из конического в цилиндрический участок матрицы, происходит увеличение напряжения $\sigma_{\alpha\theta}$ (при $s/D = 0{,}05$, $\alpha = 30°$ и $K_п = 3$, $\Delta\sigma_{\alpha\theta} \approx 0{,}1\sigma_s$), что вызывает уменьшение предельного коэффициента обжима. С учетом этого данные табл. 2 уменьшают на 3—5 %.

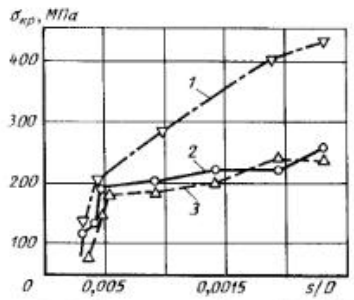


Рис. 4. График зависимости критической нагрузки от относительной толщины стенки заготовки и схемы нагружения:
1 — сжатие в обойме; *2* — свободное сжатие; *3* — сжатие с внутренним противодавлением

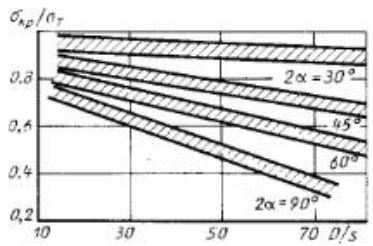


Рис. 5. График зависимости $\sigma_{кр}/\sigma_т$ от относительного диаметра D/s заготовки при обжиме в конусных матрицах с разным углом α

2. Предельные коэффициенты обжима $K_п$ при обжиме в сферической матрице

$\sigma_в$, МПа	s/D					
	Св. 0,05	0,05—0,02	0,02—0,01	0,01—0,005	0,005—0,003	0,003—0,002
150	1,54—1,49	1,49—1,43	1,43—1,35	1,35—1,28	1,28—1,25	1,25—1,19
150—250	1,47—1,43	1,43—1,39	1,39—1,31	1,31—1,25	1,25—1,22	1,22—1,16
250—350	1,43—1,39	1,39—1,31	1,31—1,25	1,25—1,19	1,19—1,16	1,16—1,11
350—450	1,39—1,31	1,31—1,25	1,25—1,19	1,19—1,16	1,16—1,13	1,13—1,08
450	1,31—1,25	1,25—1,22	1,22—1,16	1,16—1,13	1,13—1,11	1,11—1,06

Примечание. При обжиме в конической матрице по схеме на рис. 1, *а* данные таблицы уменьшают на 5—10 %; в последующих операциях обжима значения $K_п$ увеличивают на 15—20 %.

Коэффициенты обжима, приведенные в табл. 2, получены с учетом несовершенств заготовки и отклонений от идеальной формы в виде изменения толщины стенки, овальности поперечного сечения, отклонений и неоднородности механических свойств, дефектов в виде вмятин, асимметричности приложения внешней силы и пр.

Предельный коэффициент обжима можно определить графоаналитически, для чего используют график $\sigma_{\alpha\theta}$ ($K_п$), построенный по соответствующей формуле табл. 1 при известных $\sigma_в$, $\sigma_т$, $\psi_р$ и μ, R, α, s, R. Прямая, параллельная оси абсцисс, имея своей ординатой $\sigma_{кр}$, в точке пересечения с кривой графика указывает численное значение предельного коэффициента обжима для различных условий контактного трения (рис. 6). Значения коэффициентов обжима, полученные графоаналитически, следует разделить на коэффициент запаса устойчивости, равный 1,1—1,15.

При обжиме в конической матрице нагартованной заготовки с дном, полученной вытяжкой из плоской заготовки (см. рис. 1, *д*), предельный коэффициент обжима определяют по номограмме, состоящей из двух секторов (рис. 7). В правом секторе нанесены три кривые, соответствующие определенному значению показателя деформационного упрочнения n материала заготовки; по оси абсцисс отложен угол конусности α матрицы. В левом секторе нанесены кривые, соответствующие определенным значениям коэффициента вытяжки $K_в$ заготовки после разупрочняющего отжига. По оси абсцисс отложены значения предельного коэффициента обжима $K_п$. Порядок пользования номограммой показан штриховыми линиями.



Рис. 6. Схема к графоаналитическому способу определения предельного коэффициента обжима в различных условиях трения

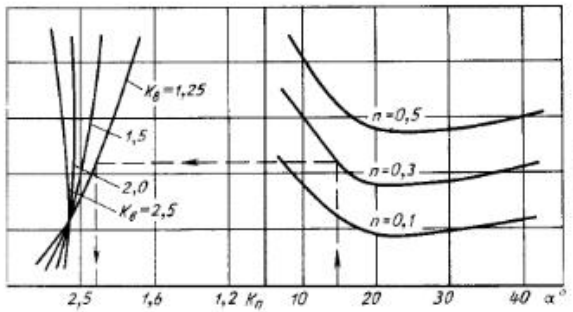


Рис. 7. Номограмма для определения предельного коэффициента обжима $K_п$ нагартованной заготовки

Экспериментальные значения предельных коэффициентов обжима при штамповке по схеме, приведенной на рис. 1, *а*, даны в табл. 3 и 4. Влияние на $K_п$ отношения D/s, угла конусности α матрицы и показателя степени n кривой упрочнения металла заготовки, установленное экспериментально, показано на рис. 8.

На предельный коэффициент обжима существенно влияет анизотропия механических свойств материала заготовки, особенно при обжиме тонкостенных труб из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов.

Радиальное противодавление на деталь в зоне передачи усилия (цилиндрический участок, деформируемый упруго) препятствует образованию круговых волн и, следовательно, повышает предельное формоизменение в зоне пластической деформации.

Радиальное противодавление создается элементами штампа для обжима в виде скользящей обоймы, охватывающей заготовку (рис. 9, *а*), или скользящей обоймы и неподвижной оправки, находящейся внутри заготовки (рис. 9, *б*).

При обжиме с радиальным противодавлением критическая степень деформации существенно выше, чем без него. Детали, деформированные без радиального противодавления, только с внешним и двусторонним противодавлением показаны на рис. 10, *а—в* соответственно. Если заготовка с относительной толщиной стенки $s/D > 0{,}06$ обжимается только с внешним противодавлением, возможно появление асимметричных складок, направленных внутрь заготовки (рис. 10, *б*).

3. Предельные коэффициенты обжима, получаемые в штампах с противодавлением и без него

Материал заготовки	Тип штампа		
	Без противодавления	С противодавлением	
		наружным	наружным и внутренним
Сталь низкоуглеродистая	1,43—1,33	1,82—1,66	3,33—1,85
Латунь Л63, Л68	1,54—1,43	2,00—1,82	3,70—3,12
Алюминий АМЦ	1,47—1,39	1,88—1,75	3,70—3,12
Дуралюмин:			
отожженный	1,37—1,25	1,66—1,59	1,86—2,50
закаленный	1,33—1,60	1,47—1,39	2,50—2,32

Примечание. Угол матрицы $\alpha = 15°$; $s/D = 0{,}02 \div 0{,}10$.

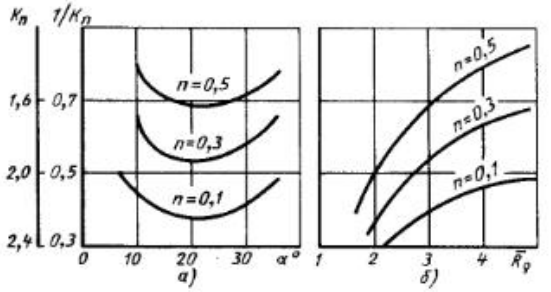


Рис. 8. График зависимости предельного коэффициента обжима:
а — от угла конусности α матрицы; *б* — от продольного радиуса кривизны $\bar{R}_\rho = 2R/D$ для материалов с различным показателем степени кривой упрочнения

При обжиме с двусторонним радиальным противодавлением потери устойчивости в зоне передачи усилия не происходит (рис. 10, *в*), однако при $s/D > 0{,}06$ появляются волны вдоль образующей или сквозные трещины, направленные под углом 45° к образующей. На рис. 11 показана заготовка из дуралюмина Д16, обжатая с высокой степенью деформации до момента появления трещин.

Если заготовка имеет дно, плавно сопрягающееся с цилиндрической круговой стенкой (например, заготовка в виде стакана, полученного вытяжкой) то создание внутреннего противодавления связано с усложнением конструкции штампа для обжима. При радиусе сопряжения дна и стенки $r \geqslant 4s$ обжим такой заготовки со стороны торца с внешним противодавлением вызывает заметное изменение формы придонного участка (рис. 12). При обжиме заготовок с дном из низкоуглеродистой стали с $s/D \approx 0{,}03 \div 0{,}04$ с внешним противодавлением коэффициент обжима $K_п = 1{,}7 \div 1{,}8$.

Формоизменение придонного участка при обжиме можно устранить созданием давления в дно заготовки или

4. Предельные коэффициенты обжима, получаемые в штампах без противодавления с различными углами конусности α° матрицы

α°	s/D					
	0,02	0,03	0,05	0,08	0,12	0,16
10	1,33	1,39	1,45	1,49	1,54	1,59
20	1,23	1,30	1,37	1,47	1,49	1,56

Примечание. Для стальных трубчатых заготовок.

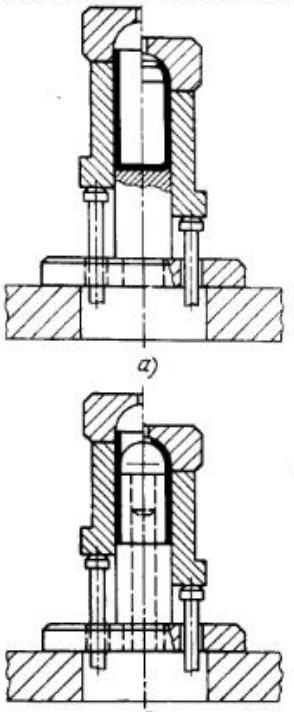


Рис. 9. Схемы штампов для обжима:
а — с внешним противодавлением; *б* — с внешним и внутренним противодавлением

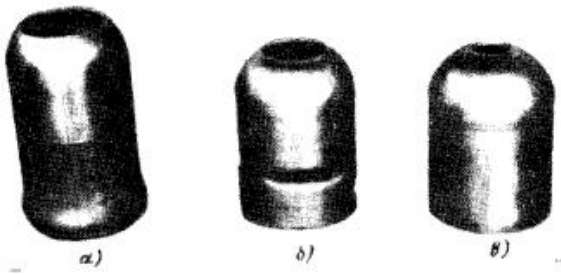


Рис. 10. Детали после обжима:
а — в свободном состоянии; *б* — только с внешним противодавлением; *в* — с двусторонним противодавлением

приданием ему слегка выпуклой формы (наружу) при вытяжке.

Предельные коэффициенты обжима $K_п$ в сферической матрице с радиальным внешним и внутренним противодавлением приведены в табл. 5. Противодавление увеличивает коэффициент обжима на 15—20 %, а совместное действие наружного и внутреннего противодавления на 35—50 %.

Предельные коэффициенты обжима, полученные экспериментально в штампах с радиальным противодавлением, приведены в табл. 3.

Расчет геометрических параметров заготовки и инструмента. При обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *а—г*, относительно тонкостенных заготовок ($s/D > 0{,}02$) с умеренной степенью деформации (до 50 %) *наибольшая толщина стенки* $s_к$ находится вблизи кромки. Применительно к изотропному металлу наибольшую толщину стенки приближенно, без учета влияния напряжения $\sigma_п$, определяют по формуле

$$s_к = s\sqrt{D/d}. \qquad (1)$$

При $D/s > 2$ и $s/D > 0{,}02$ сечение заготовки с наибольшей толщиной стенки удаляется от кромки. В этом случае $s_к$ определяют по формуле

$$s_к = s\sqrt{D/2e\cos\alpha}, \qquad (2)$$

в которой приближенно учтено влияние напряжения $\sigma_п$; e — основание натуральных логарифмов.

При обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *б*, толщина стенки цилиндрического участка изделия диаметром d переменна; она изменяется вдоль образующей от $s_к$ на кромке до s_{max} на некотором удалении от кромки и далее остается постоянной. Величина s_{max} может быть определена по формуле А. Г. Пашкевича:

$$s_{max} = s\,(D/d)^{\frac{2\sigma_s - \sigma_{\alpha 0}}{4\sigma_s + \sigma_{\alpha 0}}}, \qquad (3)$$

где $\sigma_{\alpha 0}$ — напряжение в сечение *I—I* (см. рис. 2).

При обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *д*, придонный участок может иметь неравномерную толщину стенки вследствие того, что при вытяжке заготовки она утоняется, а при обжиме — утолщается.

Для определения коэффициента обжима K, при котором утонение стенки компенсируется ее утолщением, служит номограмма, состоящая из двух секторов (рис. 13, *а*). В правом секторе расположены кривые, соответствующие предельным значениям коэффициента обжима $K_п$. По оси абсцисс отложены углы конусности α матрицы или радиусы кривизны $\bar{R}_{ск}$ матрицы с криволинейной образующей (рис. 13, *б*). В левом секторе расположены кривые, соответствующие различным относительным радиусам $\bar{R}_{ск}$ скругления дна заготовки. Порядок пользования номограммой показан штриховыми линиями. При построении номограммы принято $\mu = 0{,}1$. Значение $R_{ск}$ следует задать в зависимости от толщины материала; $R_{ск} \approx (6 \div 8)\,s$.

На изменение толщины стенки при обжиме существенно влияет анизотропия механических свойств материала заготовки, особенно тонкостенных труб из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. При обжиме заготовок из изотропных металлов ($r_{12} = r_{21} = r$) с уменьшением коэффициента анизотропии r утолщение стенки увеличивается (рис. 14).

Обжим с радиальным противодавлением относительно толстостенных заготовок ($s/D > 0{,}02$) сопровождается осадкой (утолщением зоны передачи про

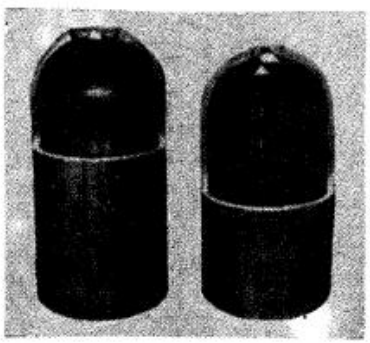


Рис. 11. Разрушение кромки алюминиевой заготовки при обжиме с внешним противодавлением

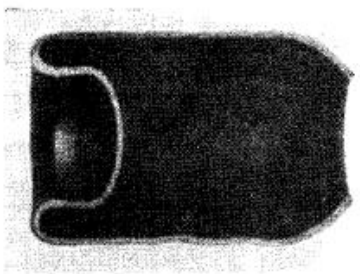


Рис. 12. Потеря устойчивости придонного участка стальной заготовки при обжиме со стороны торца с внешним противодавлением

5. Предельные коэффициенты обжима $K_п$ в сферической матрице с радиальным внешним и внутренним противодавлением

$\sigma_в$, МПа	s/D					
	0,05	0,05—0,02	0,02—0,01	0,01—0,005	0,005—0,003	0,003—0,002
Обжим с наружным противодавлением						
150	2,08—2,00	2,00—1,92	1,92—1,82	1,78—1,68	1,72—1,64	1,64—1,5
150—250	1,96—1,88	1,92—1,85	1,85—1,75	1,75—1,66	1,66—1,61	1,61—1,5
250—350	1,88—1,82	1,85—1,75	1,75—1,66	1,56—1,49	1,49—1,45	1,45—1,39
350—450	1,75—1,66	1,64—1,56	1,51—1,45	1,43—1,39	1,39—1,35	1,30—1,25
450	1,64—1,56	1,56—1,50	1,47—1,41	1,39—1,35	1,35—1,31	1,28—1,22
Обжим с наружным и внутренним противодавлением						
150	3,12—2,94	2,94—2,85	2,85—2,70	2,70—2,56	2,56—2,50	2,50—1,3
150—250	2,78—2,63	2,63—2,50	2,50—2,38	2,38—2,27	2,27—2,17	2,17—2,0
250—350	2,50—2,38	2,38—2,22	2,22—2,08	2,08—2,00	2,00—1,92	1,92—1,8
350—450	2,22—2,08	2,08—1,92	1,78—1,69	1,69—1,61	1,56—1,51	1,51—1
450	2,00—1,92	1,92—1,85	1,75—1,67	1,67—1,59	1,51—1,47	1,47—1,3

Примечание. При обжиме в конической матрице по схеме на рис. 1, *а* данные таблицы уменьшают на 5—10 %; в последующих операциях обжима данные увеличивают на 15—20 %.

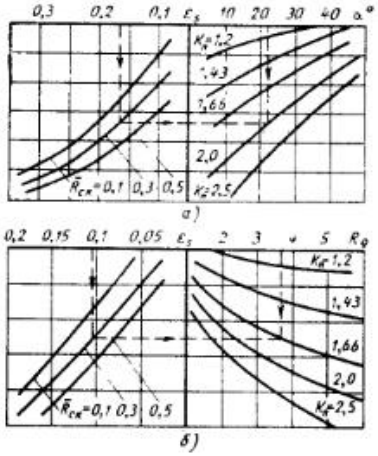


Рис. 13. Номограмма для определения размеров заготовки для обжима:
а — в конической матрице; *б* — в куполообразной матрице

дольной силы). Если противодавление только внешнее, утолщение стенки составляет 10—15 %; если двустороннее, то толщина стенки в зоне передачи продольной силы соответствует зазору между обоймой и неподвижной оправкой штампа для обжима.

Продольная длина заготовки L изменяется в процессе обжима. При использовании условия неизменности объема металла при пластическом деформировании длину L определяют

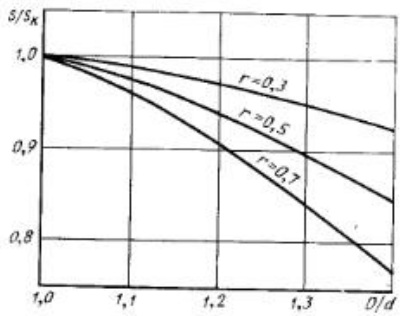


Рис. 14. График изменения отношения начальной толщины s стенки заготовки к толщине $s_к$ кромки
r — коэффициент анизотропии

в функции размеров детали по следующим формулам:

при обжиме по схеме на рис. 1, *б*

$$L \approx l_0 + \frac{d+D-2r(1-\cos\alpha)}{4D} \times \left(\frac{D-d}{2\sin\alpha} - r\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}\right)\left(1 + \sqrt{\frac{D}{d}}\right) + \frac{\pi r\alpha}{180}; \quad (4)$$

при обжиме по схеме на рис. 1, *г*

$$L \approx l_0 + l\sqrt{\frac{d}{D}} + \left(1+\frac{d}{D}\right) \times \left[\frac{1}{4}\left(1+\sqrt{\frac{D}{d}}\right) \times \left(\frac{D-d}{2\sin\alpha} - 2r\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{\pi\alpha r}{180}\right]; \quad (5)$$

при обжиме по схеме на рис. 1, *а*

$$L = l_0 + \frac{R}{2D} \times \left[\sqrt{4R^2-(d+2R-D)^2} - (2R-D)\arccos\frac{d+2R-D}{2R}\right] \times \left(1+\sqrt{\frac{D}{d}}\right); \quad (6)$$

при $R = 0{,}5D$ формула (6) имеет вид

$$L = l_0 + \frac{1}{4}\sqrt{D^2-d^2} \times \left(1+\sqrt{\frac{D}{d}}\right), \quad (7)$$

где r — радиус кривизны срединной поверхности тороидных участков *1* и *3* детали (см. рис. 1, *б* и *г*); l_0 и l — длины цилиндрических участков деталн диаметром D и d соответственно.

При обжиме по схеме на рис. 1, *е* для обеспечения параллельности кромок основания и горловины заготовка должна иметь косой срез под углом β, тангенс которого определяют по формуле А. Г. Овчинникова и В. В. Гедионова:

$$\operatorname{tg}\beta = 1{,}1\,\frac{D-d}{D\sin\alpha}(1-\cos\alpha),$$

где 1,1 — поправочный коэффициент, установленный экспериментально.

Приближенно можно считать, что длина детали равна меньшему основанию l трапеции (рис. 15). В этом случае длину заготовки определяют по формуле

$$L \approx 1{,}1\,\frac{D-d}{\sin\alpha}(1-\cos\alpha) + l. \quad (8)$$

Заготовку с косым срезом применяют при $\alpha \geqslant 25°$ и $K \geqslant 1{,}5$.

Обжим по схеме на рис. 1, *е* используют при получении переходников для соединения горизонтальных участков трубопроводов диаметром 10—400 мм.

Расчет геометрических параметров матриц. При обжиме по схемам, показанным на рис. 1, *б* и *г*, угол α наклона образующей рабочей поверхности матрицы имеет оптимальную величину $\alpha_{опт}$, при которой сила обжима минимальна. Значение $\alpha_{опт}$ зависит от коэффициента контактного трения μ:

$$\sin\alpha_{опт} = \sqrt[3]{\mu/2}. \quad (9)$$

Некоторые расчетные $\alpha_{опт}$ и экспериментальные $\alpha^э_{опт}$ значения оптимального угла конусности матрицы приведены в табл. 6.

6. Расчетные и экспериментальные оптимальные углы конусности матриц для обжима

μ	$\alpha_{опт}$	$\alpha^э_{опт}$	μ	$\alpha_{опт}$	$\alpha^э_{опт}$
0,05	17°	12°	0,15	25°	20°
0,10	21° 30′	16°	0,20	27° 30′	25°

Примечание. Экспериментальные значения $\alpha_{опт}$ получены при обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *б*.

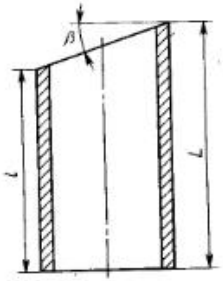


Рис. 15. Заготовка для переходника, полученного обжимом в эксцентрической конической матрице

При обжиме по схемам, показанным на рис. 1, *в*, *г*, *д*, радиус скругления $r_м$ рабочей кромки матрицы не должен быть больше естественного раднуса изгнба r_ρ краевого участка обжимаемой заготовки (см. рис. 2):

$$r_м \leqslant r_\rho = \frac{\sqrt{Ds}}{2\sin\alpha}. \quad (10)$$

При $r_м < r_\rho$ деталь теряет контакт с матрицей, и наружный диаметр ее обжатой части d_a становится меньше диаметра матрицы $d_{об}$ на величину Δd, определяемую по формуле (см. рис. 2)

$$\Delta d = \left(\sqrt{Ds}/\sin\alpha - 2r_м - s\right) \times (1-\cos\alpha). \quad (11)$$

В этом случае

$$d_м = d + s + \Delta d = d_{об} + \Delta d. \quad (12)$$

Величина Δd уменьшается с увеличением радиуса матрицы $r_м$.

Матрицы для обжима по схемам, показанным на рис. 1, *а*—*е*, должны иметь направляющую (заходную) цилиндрическую поверхность высотой $h = 0{,}1D$ (см. рис. 1, *б*). Матрицы с криволинейной образующей рабочей полости, как правило, имеют постоянный радиус кривизны R, изменяющийся от $R = D$ до $R = 0{,}25D$. С увеличением относительного радиуса кривизны R/D сила обжима уменьшается. При $R/D < 0{,}5$ и $K > 2$ обжатый участок заготовки получается частично плоским (см. табл. 1, поз. 5) при условии противодавления на его внутреннюю поверхность. Если противо-

давление отсутствует, то краевые элементы заготовки, получившие определенную кривизну при обжиме, будут стремиться сохранить ее при переходе с криволинейного участка матрицы на плоский.

При обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *в*, в матрице с образующей рабочей поверхности в виде трактрисы усилие деформирования на 10—15 % меньше, а критическая степень деформации на такую же величину больше, чем при обжиме в матрице с постоянным радиусом кривизны.

Энергосиловые характеристики, рекомендации по выбору конструктивной схемы штампа. При обжиме без радиального противодавления продольная сила деформирования определяется как произведение напряжения σ_{α_0} на площадь сечения *I—I* заготовки (см. рис. 2). Отклонения от номинальных размеров диаметра и толщины стенки заготовки, отклонения механических свойств материала, регламентированные стандартами, учитываются коэффициентом $\gamma = 1{,}1 \div 1{,}2$:

$$P_{об} = \gamma \pi D s \sigma_{\alpha_0}. \qquad (13)$$

Значения σ_{α_0} при обжиме в матрицах с различной формой рабочей полости приведены в табл. 1.

При обжиме с наружным радиальным противодавлением суммарная сила деформирования состоит из двух слагаемых: собственно силы обжима $P_{об}$ и силы $P_т$, необходимой для преодоления силы контактного трения, возникающей при перемещении ограничивающей обоймы штампа относительно заготовки:

$$P = P_{об} + P_т. \qquad (14)$$

Силу $P_т$ приближенно определяют по формуле В. Н. Фролова, полученной на основании анализа опытных данных при обжиме стальных заготовок на гидравлическом прессе:

$$P_т = \frac{2P_{об}h\mu}{D+s}\left(1 + \frac{h\mu}{D+s}\right), \qquad (15)$$

где h — высота цилиндрического участка детали диаметром D.

Расчеты по формуле (15) показывают, что при $\mu = 0{,}15$ и h, изменяющейся от D до $2D$, $P_т = (0{,}3 \div 0{,}8)\, P_{об}$ соответственно.

Работа деформации. При обжиме продольная сила изменяется по ходу матрицы. Вначале она увеличивается до момента входа краевого участка заготовки в цилиндрический поясок матрицы диаметром $d_м$ (см. рис. 1, *г*), после чего остается приблизительно постоянной до окончания процесса.

Работа деформации должна определяться применительно к определенной схеме обжима. Так, например, при обжиме по схеме на рис. 1, *б*, когда сила обжима изменяется от нуля до наибольшего значения, работа деформации

$$A_1 = \int_0^H P_{об}\, dh = \gamma \pi D s \int_0^H \sigma_{\alpha_0}\, dh,$$

где dh — элементарный путь матрицы на коническом участке детали; H — длина участка заготовки, который после обжима превращается в конусный участок детали (или путь матрицы при обжиме конусного участка детали).

Если считать, что при $K = 1{,}5 \div 2{,}0$ утолщение стенки увеличивает σ_{α_0} в среднем на 15 %, то формула может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma_{\alpha_0} \approx 1{,}15\gamma\sigma_{s\,ср}\left(1 - \frac{d}{D}\right) \times$$

$$\times (1 + \mu \operatorname{ctg}\alpha)(3 - 2\cos\alpha).$$

Сделав допущение о том, что в процессе пластической деформации площадь поверхности заготовки не изменяется, получим

$$d = \sqrt{D(D - 4H\sin\alpha)} \text{ и}$$

$$H = \frac{D^2 - d^2}{4D\sin\alpha}.$$

С учетом приведенных зависимостей работа

$$A_1 = 1{,}15\gamma D s \sigma_{s\,ср} H \times$$

$$\times\left(1 - \frac{\sqrt{D^3} - \sqrt{(D - 4H\sin\alpha)^3}}{6H\sqrt{D}\sin\alpha}\right)\times$$

$$\times (1 + \mu \operatorname{ctg}\alpha)(3 - 2\cos\alpha). \qquad (16)$$

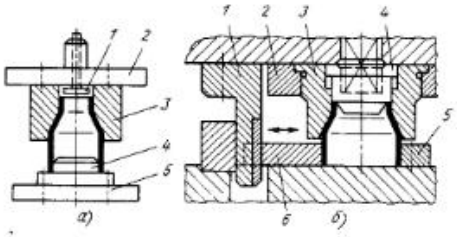


Рис. 16. Конструктивные схемы штампов для обжима: *а* — открытого (*1* — выталкиватель; *2* — верхняя плита; *3* — матрица; *4* — фиксатор; *5* — нижняя плита); *б* — полузакрытого (*1* — клин; *2* — матрицедержатель; *3* — матрица; *4* — выталкиватель; *5* — неподвижная опора; *6* — подвижная опора)

Формула (16) позволяет построить график изменения работы деформации по пути матрицы, а также установить характер влияния основных факторов на ее величину.

При обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *г*, работа деформации состоит из двух слагаемых: работы A_1, затрачиваемой на деформирование конического участка детали, и работы A_2, затрачиваемой в период установившегося процесса обжима; $A = A_1 + A_2$.

Если считать, что изменение σ_{α_0} по пути матрицы от начала обжима до момента входа краевого участка заготовки в цилиндрический поясок матрицы диаметром $d_м$ соответствует линейному закону, то работа деформации при обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *г*, определяется по формуле

$$A = P_{об}(0{,}5H + H_ц), \qquad (17)$$

где H — длина участка заготовки, из которого после обжима получается коническая часть детали; $H_ц$ — длина цилиндрического участка детали диаметром d.

При обжиме по схеме на рис. 1, *б* $H_ц = 0$; при этом формула (17) принимает следующий вид:

$$A = A_1 = 0{,}5P_{об}H. \qquad (18)$$

При обжиме с наружным радиальным противодавлением работа деформации

$$A_п = A + A_т, \qquad (19)$$

где $A_т$ — работа, затрачиваемая на преодоление силы контактного трения $P_т$, определяемой по формуле (15).

При обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *г*,

$$A_т = P_т(H + H_п). \qquad (20)$$

Наиболее точно работа деформации определяется при использовании диаграммы усилие — путь, автоматически записанной при обжиме. Работа деформации численно равна площади этой диаграммы (находится планиметрированием).

Рекомендации по выбору конструктивной схемы штампов. Выбор конструктивной схемы штампа для обжима зависит от требуемого коэффициента обжима. Если K меньше предельного, при обжиме без радиального противодавления (см. табл. 2) применяют открытые штампы (рис. 16, *а*). При коэффициенте обжима, близком к предельному, применяют полузакрытые штампы с внешним противодавлением у основания заготовки (рис. 16, *б*). При коэффициенте обжима больше предельного в зависимости от его значения (см. табл. 3) применяют закрытые штампы с наружным радиальным противодавлением (рис. 17, *а*) или штампы с двусторонним (наружным и внутренним) противодавлением (рис. 17, *б*).

Обжатая заготовка, как правило, остается в матрице, поэтому штамп должен иметь верхний выталкиватель (на рис. 17, *а* не показан). Если деталь обжимается не по всей высоте и имеет цилиндрический участок диаметром D (см. рис. 1), применяют штампы со скользящей обоймой, препятствующей выпучиванию заготовки, прикрепляемой к торцу матрицы для обжима (рис. 17, *б*), что обеспечивает свободное удаление детали из полости матрицы.

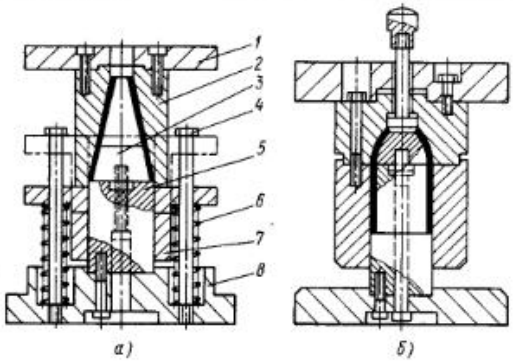


Рис. 17. Конструктивные схемы штампов для обжима конусных (*а*) и куполообразных (*б*) деталей:
1 — верхняя плита; *2* — матрица; *3* — фиксатор; *4* — упорный винт; *5* — упорная оправка; *6* — пружина; *7* — обойма; *8* — нижняя плита

Пример расчета технологических параметров обжима. Требуется рассчитать размеры заготовки, выбрать конструктивную схему штампа для обжима, определить усилие и работу деформирования, необходимые для штамповки детали, показанной на рис. 18, рассчитать геометрические параметры матрицы. Заготовкой служит стальная бесшовная горячекатаная труба диаметром $D_н = 102$ мм, со стенкой толщиной $s = 4$ мм, у которой $\sigma_в = 500$ МПа, $\sigma_т = 420$ МПа, относительная деформация в момент начала образования шейки $\varepsilon_ш = n = 0{,}223$. Относительная толщина стенки заготовки $s/D = 4/102 = 0{,}04$; срединные диаметры $D = 102 - 4 = 98$ мм, $d = 68 - 4 = 64$ мм; коэффициент обжима $K = 98/64 = 1{,}5$.

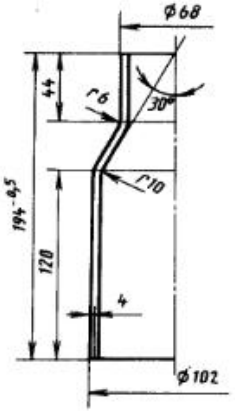


Рис. 18. Чертеж детали, полученной обжимом

1. Толщину стенки на кромке обжатого участка детали приближенно определяем по формуле (1), поскольку $K < 2$:

$$s_к = 4\sqrt{\frac{98}{64}} = 4{,}95 \text{ мм}.$$

2. Длину заготовки определяем по формуле (4):

$$L = 120 + 44\sqrt{\frac{64}{98}} + \left(1 + \frac{64}{98}\right) \times$$

$$\times \left[\frac{1}{4}\left(1 + \sqrt{\frac{98}{64}}\right)\left(\frac{98-64}{2 \cdot 0{,}5} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - 2 \cdot 20 \cdot 0{,}27\right)\right] + \frac{3{,}14 \cdot 8 \cdot 30}{180} = 181{,}2 \text{ мм}.$$

3. Конструктивную схему штампа выбираем по результатам сравнения требуемого $K = 1{,}5$ и предельного коэффициента обжима $K_п$. По табл. 2, составленной применительно к обжиму по схеме, показанной на рис. 1, *а* (без радиального противодавления при $R/D = 1/2$), для $s/D = 0{,}05 \div 0{,}02$ и $\sigma_в = 350 \div 450$ МПа $K_п = 1{,}31 \div 1{,}25$. Поскольку $K > K_п$, выбираем штамп с радиальным противодавлением. В этом случае при обжиме по схеме, показанной на рис. 1, *г* с внешним противодавлением, $K_п = 1{,}64 \div 1{,}56$ (см. табл. 5). С учетом того, что в данном примере обжим осуществляется по схеме, показанной на рис. 1, *г*, $K_п$ следует уменьшить примерно на 8 % (на 5 %, потому что рабочая полость матрицы конусная, а не сферическая, и на 3 % вследствие изгиба и спрямления краевой части заготовки при формоизменении цилиндрического участка диаметром d). Тогда при $s/d = 0{,}04$ $K_п = 1{,}5$. На основании изложенного выбираем закрытый штамп с внешним противодавлением, конструктивная схема которого показана на рис. 19.

4. Суммарную силу обжима P определяем по формуле (14), предварительно рассчитав собственно силу обжима по формуле (13).

Среднее напряжение текучести (см. табл. 1)

$$\sigma_{s\,ср} = \frac{1}{2}\left[420 + \frac{500}{0{,}223^{0{,}223}} \times \right.$$

$$\left. \times \left(\ln\frac{64}{98}\right)^{0{,}223} e^{0{,}223}\right] = 571 \text{ МПа}.$$

Поскольку обжим осуществляется по схеме на рис. 1, *г*, для определения σ_{α_0} используем формулу, приведенную в табл. 1 (поз. 2) при $\mu = 0{,}1$; тогда сила обжима по формуле (13)

$$P_{об} = 1{,}2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}098 \cdot 0{,}004 \times$$

$$\times \frac{571}{2}\left[\left(1 + 0{,}1 \cdot 1{,}732\right) \times \right.$$

$$\left. \times \left(1 - \frac{0{,}064}{0{,}098}\right) + \sqrt{\frac{0{,}004}{0{,}064}} \cdot 0{,}5\right] \times$$

$$\times \left[1 + \sqrt{\frac{0{,}098}{0{,}064}}\,(3 - 2 \cdot 0{,}866)\right] =$$

$$= 0{,}6368 \text{ МН} = 636{,}8 \text{ кН}.$$

Силу, необходимую для преодоления сопротивления трению, при перемещении обоймы штампа (при $\mu = 0{,}1$) определяем по формуле (15):

$$P_т = \frac{2 \cdot 0{,}6368 \cdot 0{,}12 \cdot 0{,}1}{0{,}102} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{0{,}12 \cdot 0{,}1}{0{,}102}\right) = 0{,}1674 \text{ МН} =$$

$$= 167{,}4 \text{ кН}.$$

Сумма продольной силы обжима и силы трения (суммарная сила обжима)

$$P = 636{,}8 + 167{,}4 = 804{,}2 \text{ кН}.$$

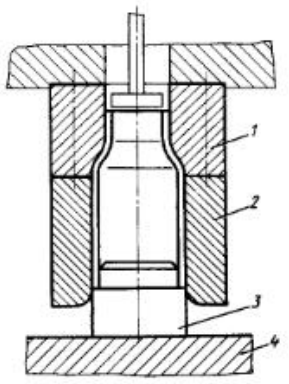


Рис. 19. Конструктивная схема штампа для обжима детали, показанной на рис. 18:
1 — матрица; *2* — обойма; *3* — опора; *4* — выталкиватель

5. Работу деформации $A_п$ определим по формуле (19), предварительно рассчитав значения H и A по формулам (16), (17) и $A_т$ по формуле (20):

$$H = \frac{0{,}098^2 - 0{,}064^2}{4 \cdot 0{,}098 \cdot 0{,}5} = 0{,}028 \text{ м};$$

$$A = 636{,}8\,(0{,}5 \cdot 0{,}028 + 0{,}044) =$$

$$= 36{,}93 \text{ кДж};$$

$$A_т = 167{,}4\,(0{,}028 + 0{,}044) =$$

$$= 12{,}07 \text{ кДж};$$

$$A_п = 36{,}93 + 12{,}07 = 49{,}0 \text{ кДж}.$$

Расчеты по формулам (16) и (18) дают близкие результаты.

6. Радиус рабочей кромки матрицы конструктивно принимаем равным $r_м = 10$ мм. При этом параметр Δd (см. рис. 2) рассчитываем по формуле (11):

$$\Delta d = \left(\frac{\sqrt{98 \cdot 4}}{0{,}5} - 2 \cdot 10 - 4\right) \times$$

$$\times (1 - 0{,}866) = 2{,}1 \text{ мм}.$$

Зная Δd, определим рабочий диаметр матрицы:

$$d_м = d_{об} + \Delta d = 68 + 2{,}1 =$$

$$= 70{,}1 \text{ мм}.$$

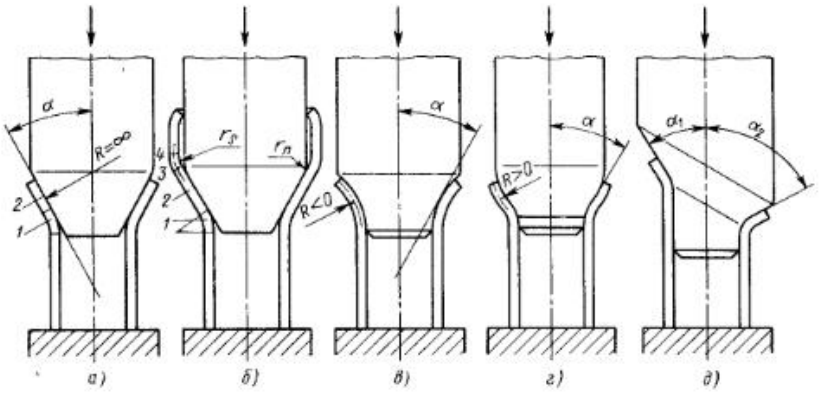


Рис. 20. Схемы раздачи трубчатых заготовок пуансонами с различной формой рабочего участка

При радиусе матрицы $r_м \leqslant r_р$ радиус детали $r_д$ равен естественному радиусу изгиба, определяемому по формуле (10):

$$r = r_р - \frac{s}{2} = \frac{\sqrt{98 \cdot 4}}{2 \cdot 0{,}5} - \frac{4}{2} \simeq 18 \text{ мм}.$$

Для получения указанного на чертеже детали радиуса $r = 6$ мм в технологическом процессе необходимо предусмотреть дополнительную штамповочную операцию — калибровку радиуса.

2. РАЗДАЧА

Формоизменение заготовки, деформированное состояние. Под действием внешней силы заготовка перемещается относительно пуансона и принимает форму оболочки, состоящей из сочетания участков различной формы: тороидного *1* и конического *2* (рис. 20, *а*); двух тороидных *1* и *3*, конического *2* и цилиндрического *4* (рис. 20, *б*); участка *1*, образованного вращением дуги радиусом R вокруг оси симметрии заготовки (рис. 20, *г*).

Заготовка для раздачи трубчатой формы, может быть с цилиндрической и нецилиндрической стенкой, кругового и некругового сечения.

Пуансоны для раздачи, как правило, имеют осесимметричную форму. Рабочая часть — коническая, выпуклая или вогнутая, с кривизной образующей положительной или отрицательной.

Применяя раздачу как первый переход штамповки, можно получать детали с фланцем, перпендикулярным к оси симметрии детали, а также наклонным к ней на угол 35—40°. Для получения деталей с наклонным фланцем используют асимметричные пуансоны с переменным по контуру поперечного сечения углом наклона образующей (рис. 20, *д*). Переходы штамповки изделий с фланцем показаны на рис. 21. При получении фланцев, перпендикулярных к оси симметрии заготовки на трубах из стали 20 с относительной толщиной стенки $s/D > 0{,}02$, предельное отношение диаметра фланца к диаметру заготовки составляет $D_ф/D = 1{,}46 \div 1{,}48$. Технологический процесс изготовления детали с наклонным фланцем включает локальный нагрев очага деформации (для сплава АМг6 температура нагрева 420 °С). Изготовление деталей с наклонным фланцем возможно и без нагрева, однако в этом случае предельная деформация значительно меньше.

Схема внешних и внутренних сил, напряженное состояние. При раздаче на заготовку действует продольная внешняя сила $P_{пр}$, которая насаживает ее на пуансон. При этом на внутренней поверхности заготовки, контактирующей с пуансоном и перемещающейся относительно него, возникают контактные нормальные σ_n и контактные касательные (от сил трения) напряжения $\mu\sigma_n$ (рис. 22).

Внешняя поверхность заготовки свободна от напряжений, а контактные нормальные напряжения σ_n при малой относительной толщине стенки ($s/D < 0{,}02$) значительно меньше напряжения текучести, и их влияние на условие перехода в пластическое состояние и утонение стенки незначительно.

В связи с тем, что к заготовке приложена продольная сила $P_{пр}$ и при этом происходит увеличение поперечных кольцевых элементов заготовки, в зоне пластической деформации возникают внутренние напряжения: меридиональное сжимающее σ_α и окружное растягивающее σ_θ.

Напряжения σ_α изменяются вдоль образующей деформируемого участка детали от нуля в точке K, лежащей на его торце, до наибольшего значения $\sigma_{\alpha 0}$ в сечении $I—I$ (см. рис. 22).

Окружные растягивающие напряжения σ_θ также изменяются вдоль образующей: от наибольшего значения $\sigma_{\theta 0}$ в сечении $I—I$ до наименьшего значения в точке K. При раздаче по схеме, показанной на рис. 20, *б*, наибольшее значение $\sigma_{\alpha 0}$, с учетом упрочнения, уменьшения толщины стенки, изгиба и спрямления заготовки при перемещении ее на цилиндрический участок пуансона, определяется по следующим формулам:

а) при учете упрочнения среднеарифметическим между максимальным и минимальным значениями напряжений текучести в очаге деформации $\sigma_{s\,ср} = 0{,}5\sigma_в\ (1 + D_р/D)$ при линейной аппроксимации диаграммы упрочнения 1-го вида

$$\sigma_{\alpha 0} = \frac{\sigma_в}{4}\left(\frac{D_р}{D} + 1\right)\left[\left(\frac{D_р}{D} - 1\right) \times \right.$$
$$\left. \times (1 + \mu \operatorname{ctg}\alpha) + 2\sqrt{s/D_р}\sin\alpha\right] \times$$
$$\times \left(1 + \sqrt{\frac{D}{D_р}}\right)(3 - 2\cos\alpha); \quad (21)$$

б) при учете упрочнения напряжением текучести для средней, по очагу деформации, степени деформации ε_θ при степенной аппроксимации диаграммы упрочнения (по С. И. Губкину)

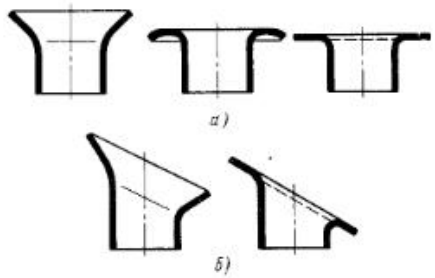


Рис. 21. Переходы штамповки деталей: *а* — с фланцем, перпендикулярным к оси симметрии детали; *б* — с наклонным фланцем

$$\sigma_{\alpha 0} = \frac{\sigma_в}{1 - \psi_ш}\left[\frac{R - r_э}{\psi_ш (R + r_э)}\right]^{\frac{\psi_ш}{1-\psi_ш}} \times$$
$$\times \left[\left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg}\alpha}\right)\left(\frac{R}{r_э} - 1\right) + \right.$$
$$\left. + \sqrt{\frac{2s}{R}}\sin\alpha\right]\left(1 + \sqrt{\frac{r_э}{R}}\right) \times$$
$$\times (3 - 2\cos\alpha), \quad (22)$$

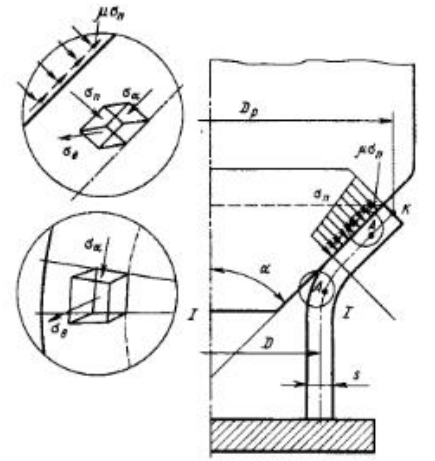


Рис. 22. Схема внешних и внутренних сил при раздаче, напряженное состояние очага пластической деформации

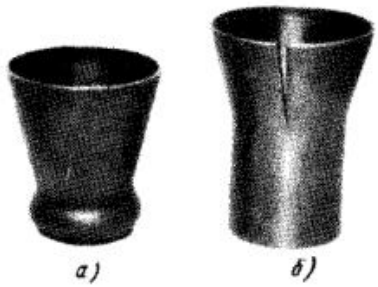


Рис. 23. Виды потери устойчивости при раздаче:
а — поперечная круговая волна; б — локальная деформация (шейка)

или, принимая во внимание, что $n = \ln(1 + \delta_{ш})$ и $\delta_{ш} = \psi_{ш}/1 - \psi_{ш}$, $R_{и} = D_{р}/2$ и $r_{з} = D/2$ (см. рис. 22), формула (22) примет вид

$$\sigma_{\alpha_0} = \frac{\sigma_{в} e^{n}}{2}\left[\frac{e^{n}(D_{р} - D)}{(e^{n}-1)(D_{р}+D)}\right]^{e^{n}-1} \times$$

$$\times \left[(1 + \mu \operatorname{ctg}\alpha)\left(\frac{D_{р}}{D} - 1\right) + \right.$$

$$\left. + 2\sqrt{\frac{s}{D_{р}}}\sin\alpha\right]\left(1 + \sqrt{\frac{D}{D_{р}}}\right) \times$$

$$\times (3 - 2\cos\alpha), \qquad (23)$$

где $\psi_{ш}$ и $\delta_{ш}$ — соответственно равномерное относительное сужение и удлинение при растяжении; α — угол конусности детали; D — диаметр заготовки; $D_{р}$ — диаметр деформированного раздачей участка заготовки.

При раздаче по схеме, показанной на рис. 20, *а*, слагаемое $2\sqrt{\frac{s}{D}}\sin\alpha$, учитывающее изгиб и спрямление заготовки при переходе с конического участка пуансона на цилиндрический большего диаметра, в формуле (22) приравнивается нулю.

Сжимающее напряжение σ_{α_0}, возникающее при раздаче по схемам на рис. 20, *в—д*, приближенно определяется по формуле (22) с учетом того, что α — угол между осью симметрии детали и касательной к криволинейной образующей в точке, лежащей на ее середине. При определении σ_{α_0} применительно к схеме на рис. 22, *д* принимается средний угол наклона фланца $\alpha_{ср} = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ (α_1 и α_2 — наименьший и наибольший угол наклона фланца).

Предельный коэффициент раздачи. Формоизменение при раздаче ограничено явлением потери устойчивости. При определенной (критической) величине продольных сил сжатия на заготовке появляются поперечные круговые волны (рис. 23, *а*); при определенной (критической) величине окружных растягивающих сил в одном или одновременно в нескольких местах краевого участка деформируемой заготовки появляется шейка, после чего наступает разрушение в виде трещины (рис. 23, *б*).

Вид потери устойчивости зависит от относительной толщины стенки s/D заготовки и ее материала, способа закрепления заготовки в штампе, формы пуансона для раздачи и др. При раздаче труб из сплава АМг2М коническим пуансоном ($\alpha = 15 \div 30°$) при $s/D < 0{,}03$ появляются трещины, а при $s/D = 0{,}01 \div 0{,}03$ — поперечные круговые волны. При раздаче стальных заготовок с $s/D < 0{,}02 \div 0{,}4$ складкообразование наступает до появления трещин; при $s/D > 0{,}02 \div 0{,}4$ на кромке заготовки появляются трещины.

Критическое напряжение, при котором появляются волны, приближенно можно определить по формуле В. С. Вольмира (см. с. 262) или используя экспериментальные данные (см. рис. 5).

Коэффициент раздачи имеет предельное значение $K_{п} = D_{р}/D$, когда по мере продвижения заготовки по пуансону и увеличения ее диаметра $D_{р}$ напряжение σ_{α} (или напряжение σ_{θ}) достигнет критического значения $\sigma_{кр}$, при котором происходит потеря устойчивости.

При раздаче по схеме, показаиной на рис. 20, *а*, предельный коэффициент раздачи определяют по следующим формулам:

7. Экспериментальные значения предельных коэффициентов раздачи для различных металлов

Марка материала	$K_{п}$	Марка материала	$K_{п}$	Марка материала	$K_{п}$
Д16Т	1,28—1,19	АМг3М	1,33—1,26	30ХГСА	1,43—1,35
Д16М	1,33—1,25	АМг6М	1,35—1,25	Сталь 20	1,49—1,43
АМгМ	1,39—1,33	12Х18Н9Т	1,47—1,35	ВТ1	1,33—1,28

Примечание. При $s/D \geqslant 0{,}02$; $\alpha = (10 \div 30)°$

а) по условию появления круговых волн (приближенно)

$$K_{п} = \sqrt{\frac{2{,}2\varphi\sigma_{т}}{\sigma_{в}(1 + \mu \operatorname{ctg}\alpha)(3 - 2\cos\alpha)}} + 1, \qquad (24)$$

где $\varphi = \sigma_{кр}/\sigma_{т}$ — коэффициент устойчивости, зависящий от s/D (см. рис. 5);

б) по условию появления трещин

$$K_{п} = \frac{\exp\sqrt{(2s/D)\sin\alpha}}{1 - \psi_{ш}}, \qquad (25)$$

или, учитывая, что $\psi_{ш} = \delta_{ш}/1 + \delta_{ш}$ и $n = \ln(1 + \delta_{ш})$,

$$K_{п} = \exp\left[n + \sqrt{(2s/D)\sin\alpha}\right]. \qquad (26)$$

Предельный коэффициент раздачи по условию появления круговых волн более точно можно определить графоаналитически, используя график зависимости σ_{α_0} (K), построенный по формуле (22) при известных $\sigma_{в}$, n, μ, α, s и D. Прямая, параллельная оси абсцисс, имея своей ординатой $\sigma_{кр}$, в точке пересечения с кривой графика дает численное значение $K_{п}$ (см. рис. 6).

Учитывая возможные отклонения механических свойств материала заготовки, ее формы и размеров, предельные коэффициенты раздачи, полученные расчетом по формулам (24) и (25), а также графоаналитически, следует уменьшать на 10—15 %. При этом предельные коэффициенты раздачи $K_{п}$ являются допустимыми.

Для определения предельного коэффициента раздачи по условию появления трещины труб из алюминевых и титановых сплавов диаметром $D = 10 \div 100$ мм с толщиной стенки $s = 1 \div 3$ мм В. И. Глазков предложил эмпирическую формулу

$$K_{п} = 1 + \nu\delta_{10}, \qquad (27)$$

где δ_{10} — относительное удлинение при растяжении стандартного образца; δ — относительное удлинение кромки заготовки в момент разрушения; $\nu = \delta/\delta_{10}$ — коэффициент;

$$\nu = 0{,}000173D^{2} - 0{,}033D + 2{,}76. \qquad (28)$$

Значения ν в зависимости от D приведены ниже.

D, мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ν	2,45	2,15	1,90	1,70	1,55	1,40	1,30	1,25	1,22	1,20

Для других материалов предельные коэффициенты раздачи приведены в табл. 7.

Экспериментальные значения предельных коэффициентов раздачи для стальных трубчатых заготовок при $\alpha = 20°$ по схеме, показаиной на рис. 20, а (данные Л. А. Шофмана), в зависимости от s/D следующие:

s/D	0,04	0,06	0,08
K	1,45	1,51	1,54
s/D	0,10	0,12	0,14
K	1,56	1,58	1,61

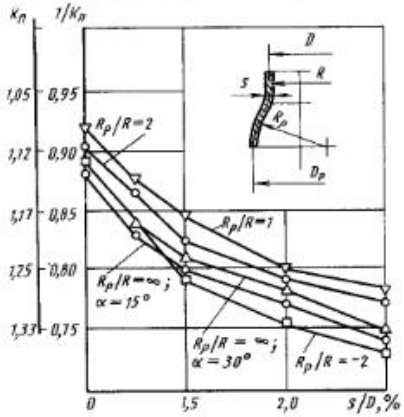


Рис. 24. График зависимости предельного коэффициента раздачи от относительной толщины заготовки при раздаче трубы диаметром 50 мм (сплав АМг2М) пуансонами различной формы

Экспериментально установлено, что с увеличением относительной толщины s/D заготовки предельный коэффициент раздачи заметно увеличивается; при этом интенсивность влияния относительной толщины стенки ослабевает с увеличением отношения s/D. Форма пуансона при радиусе кривизны R его образующей, изменяющейся от $R=\infty$ (при $\alpha=15\div30°$) до $R=D$, на коэффициент раздачи K влияет несущественно (рис. 24).

При раздаче без смазочного материала предельный коэффициент раздачи больше, однако отсутствие смазочного материала вызывает увеличение деформирующей силы, а также повышение вероятности схватывания (налипания) материала заготовки на пуансон.

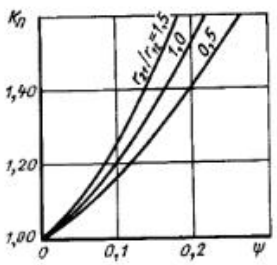


Рис. 25. График зависимости предельного коэффициента раздачи $K_п$ от относительного сужения ψ при растяжении для металлов с различной анизотропией механических свойств

Предельный коэффициент раздачи зависит, так же как и предельный коэффициент обжима, от анизотропии механических свойств материала заготовки. С увеличением отношении коэффициентов поперечной деформации при линейном растяжении r_{12}/r_{21} предельный коэффициент раздачи $K_п$ увеличивается (рис. 25). Для получения повышенной степени деформации при раздаче необходимо, чтобы $r_{21}<r_{12}$, а значение каждого из них было бы больше 0,5. Анизотропия свойств особенно неблагоприятно влияет на предельное формоизменение сплавов на основе алюминия при выполнении операций холодной штамповки, так как последняя способствует интенсивному утонению и появлению трещин в очаге деформации, образованию фестонов и т. п. Для устранения возможности появления фестонов при раздаче и разнотолщинности вдоль кромки деформированного участка заготовки следует применять изотропные материалы, у которых $r_{12}=r_{21}=r$.

Раздача с радиальным противодавлением. Если заготовка имеет относительную толщину стенки s/D, при которой потеря устойчивости вызывает появление поперечных круговых волн, раздачу целесообразно вести с радиальным противодавлением. Как и при обжиме, радиальное противодавление создается скользящей обоймой, охватывающей заготовку (внешнее противодавление), или скользящей обоймой и неподвижной оправкой, находящейся внутри заготовки (двустороннее противодавление).

При раздаче с радиальным противодавлением потери устойчивости в зоне передачи продольной силы не происходит, в связи с чем предельный коэффициент раздачи для пластичных материалов (например, сталь 12Х18Н9Т) увеличивается на 20—25 % по сравнению с коэффициентом раздачи, выполняемой без радиального противодавления. При раздаче заготовок из малопластичных материалов радиальное противодавление существенного влияния на предельный коэффициент раздачи не оказывает.

Расчет геометрических параметров заготовки и инструмента. *Толщина стенки* вдоль образующей деформированного участка заготовки переменна. Толщина стенки заготовки зависит от соотношения напряжений σ_α и σ_θ. На кромке $\sigma_\alpha=0$; $\sigma_\theta=\sigma_s$. В этом случае краевая часть заготовки находится в условиях, близких к линейному растяжению, и толщину стенки определяют по формуле

$$s_к = s\sqrt{\frac{D}{D_p}}. \qquad (29)$$

При $|\sigma_\alpha|=|\sigma_\theta|$ толщина стенки равна исходной толщине заготовки ($s_k=s$); при $|\sigma_\alpha|>|\sigma_\theta|$ происходит ее утонение. Зона утонения стенки существенно больше зоны утолщения.

На изменение толщины стенки при раздаче заготовок из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов существенное влияние оказывает анизотропия механических свойств. Исследования В. И. Мордасова показали, что при раздаче заготовок из трансверсально изотропных металлов ($r_{12}=r_{21}=r$) с увеличением r (при постоянном K) утонение стенки уменьшается, а с увеличением K — увеличивается (рис. 26).

Раздача относительно толстостенных заготовок ($s/D>0{,}02$) с радиальным противодавлением сопровождается осадкой (утолщением) зоны передачи продольной силы. При внешнем противодавлении утолщение стенки составляет 10—15 %.

Продольная длина заготовки L в процессе раздачи изменяется. При использовании условия неизменности объема металла при пластическом деформировании длину L определяют в функции размеров детали по следующим формулам:

а) при раздаче по схеме, показанной на рис. 20, *а*

$$L\approx l_0+\frac{D_p+D+2r(1-\cos\alpha)}{4D}\times\left(\frac{D_p-D}{2\sin\alpha}-r\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}\right)\times\left(1+\sqrt{\frac{D}{D_p}}\right)+\frac{\pi r\alpha}{180}; \qquad (30)$$

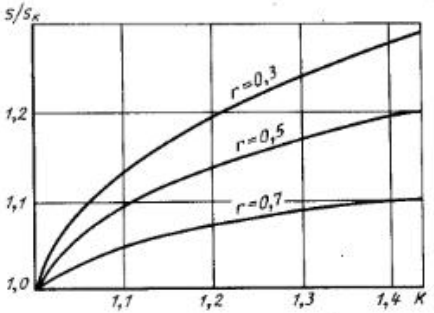


Рис. 26. График изменения толщины стенки заготовки $s/s_к$ по очагу деформации при раздаче анизотропной трубы; r — коэффициент анизотропии

б) при раздаче по схеме на рис. 20, *б*

$$L\approx l_0+l\sqrt{\frac{D_p}{D}}+\left(1+\frac{D_p}{D}\right)\times\left[\frac{1}{4}\left(1+\sqrt{\frac{D}{D_p}}\right)\times\left(\frac{D_p-D}{2\sin\alpha}-2r\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}\right)\right]+\frac{\pi r\alpha}{180}, \qquad (31)$$

где r — радиус кривизны срединной поверхности тороидных участков детали; l_0 и l — длины цилиндрических участков диаметром D и D_p соответственно.

Расчет геометрических параметров пуансона. При раздаче по схемам рис. 20, *а*, *б* угол α наклона образующей рабочей поверхности пуансона имеет оптимальную величину $\alpha_{опт}$, при которой продольная сила раздачи наименьшая. При малых коэффициентах трения ($\mu=0{,}05\div0{,}10$) $\alpha_{опт}=15\div20°$.

Радиус переходной поверхности конического и цилиндрического участков пуансона $r_п$ при раздаче по схеме, показанной на рис. 20, *б*, не должен быть больше естественного радиуса изгиба $r_р$, который определяют по формуле

$$r_п\leqslant r_р=\frac{\sqrt{D_p s}}{2\sin\alpha}. \qquad (32)$$

При $r_п < r_ρ$ деталь теряет контакт с пуансоном; при этом внутренний его диаметр $D_{рв}$ становится больше диаметра пуансона $D_п$ на величину ΔD (см. рис. 20, *б*), которую определяют по формуле

$$\Delta D = (\sqrt{D_р s/\sin\alpha} - 2r_п - s) \times \times (1 - \cos\alpha). \quad (33)$$

В этом случае

$$D_п = D_{рв} - \Delta D = D_р - s - \Delta D. \quad (34)$$

При раднусе пуансона $r_п < r_ρ$ радиус детали r равен естественному радиусу изгиба $r_ρ$, определяемому по формуле (32). Если необходимо получить $r < r_ρ$, требуется дополнительная штамповочная операция — калибровка радиуса.

При раздаче по схеме, показанной на рис. 20, *в*, пуансоном, имеющим образующую рабочей поверхности в виде трактрисы, продольная сила раздачи на 10—15 % меньше, чем при раздаче пуансоном с образующей рабочей поверхности постоянного радиуса кривизны.

Энергосиловые характеристики, рекомендации по выбору конструктивной схемы штампа. При раздаче без радиального противодавления продольную силу деформирования определяют как произведение напряжения σ_{α_0} на площадь поперечного сечения *I—I* заготовки:

$$P_р = \gamma\pi D s\sigma_{\alpha_0}, \quad (35)$$

где $\gamma = 1{,}1 \div 1{,}2$ — коэффициент, учитывающий отклонения от номинальных размеров диаметра и толщины стенки заготовки, отклонения механических свойств ее материала, регламентированные стандартами; σ_{α_0} — наибольшее по очагу деформации радиальное сжимающее напряжение, определяемое по формуле (21) или (22) с учетом особенностей схемы выполнения операции.

При раздаче с наружным радиальным противодавлением суммарная сила деформирования состоит из двух слагаемых: собственно силы раздачи $P_р$ и силы $P_т$, необходимой для преодоления сопротивления контактного трения, возникающего при перемещении ограничивающей обоймы штампа для раздачи относительно заготовки:

$$P = P_р + P_т. \quad (36)$$

Силу $P_т$ приближенно определяют по формуле В. Н. Фролова:

$$P_т = \frac{2P_р h\mu}{D+s}\left(1 + \frac{h\mu}{D}\right), \quad (37)$$

где h — высота цилиндрического участка детали диаметром D.

При $\mu = 0{,}15$ и $h/D = 1 \div 2$ $P_т = (0{,}3 \div 0{,}8)\, P_р$.

Работу деформации A в общем виде определяют по формуле

$$A = \int_0^H P_р\, dh = \gamma\pi D \int_0^H \sigma_{\alpha_0}\, dh, \quad (38)$$

где dh — элементарный ход пуансона на коническом участке детали; H — длина участка заготовки, из которого после раздачи получается коническая часть детали (или путь пуансона при получении конусной части детали).

Приближенно можно считать, что влияние утонения, способствующее уменьшению σ_{α_0}, компенсируется влиянием упрочнения металла, способствующего увеличению σ_{α_0}. В этом случае для определения работы деформации при раздаче по схеме, показанной на рис. 20, *а*, может быть принято следующее выражение:

$$\sigma_{\alpha_0} = \sigma_s (1 + \mu \operatorname{ctg}\alpha)(D_р/D - 1) \times \times (3 - 2\cos\alpha).$$

Из условия неизменности поверхности заготовки в процессе пластической деформации можно определить $D_р$ в зависимости от хода пуансона H:

$$D_р = \sqrt{D(D - 4H\sin\alpha)};$$

$$H = \frac{D_р^2 - D^2}{4D\sin\alpha}.$$

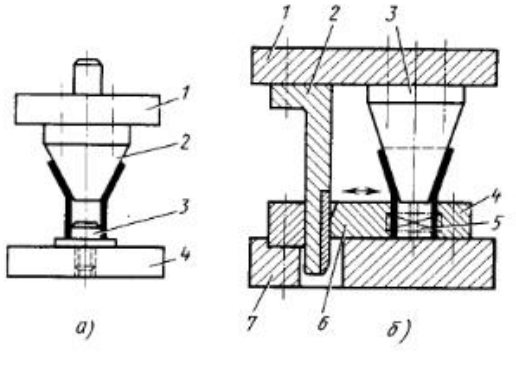


Рис. 27. Конструктивные схемы штампов для раздачи:
а — открытого (*1* — верхняя плита; *2* — пуансон; *3* — фиксатор; *4* — нижняя плита); *б* — полузакрытого (*1* — верхняя плита; *2* — клин; *3* — пуансон; *4* — неподвижная опора; *5* — пружина; *6* — подвижная опора; *7* — нижняя плита)

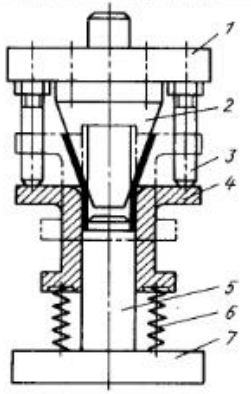


Рис. 28. Конструктивная схема закрытого штампа для раздачи с наружным радиальным противодавлением:
1 — верхняя плита; *2* — пуансон; *3* — толкатель; *4* — обойма; *5* — опорная оправка; *6* — пружина; *7* — нижняя плита

С учетом приведенных зависимостей работа деформации при раздаче по схеме на рис. 20, *а*

$$A = \gamma\pi D s\sigma_s H \times \times \left(\frac{\sqrt{(D + 4H\sin\alpha)^3} - \sqrt{D^3}}{6H\sqrt{D}\sin\alpha} - 1\right) \times \times (1 + \mu \operatorname{ctg}\alpha)(3 - 2\cos\alpha). \quad (39)$$

Формула (39) позволяет построить график изменения работы деформации по пути пуансона, а также установить характер влияния основных факторов на ее величину

При раздаче по схеме, показанной на рис. 20, *б*, работа деформации, как и при обжиме, состоит из двух слагаемых: работы A_1, затрачиваемой на деформирование конического участка детали, и работы A_2, затрачиваемой в период установившегося процесса раздачи; $A = A_1 + A_2$. Если считать, что изменение σ_{α_0} по пути пуансона от начала раздачи до момента выхода краевого участка заготовки на цилиндрический участок пуансона диаметром $D_р$ соответствует линейному закону, то работу деформации при раздаче по указанной схеме определяют по формуле

$$A = P(0{,}5H + H_ц), \quad (40)$$

где $H_ц$ — длина цилиндрического участка детали диаметром $D_р$.

При раздаче по схеме, показанной на рис. 20, *а*, $H_ц = 0$; при этом формула (40) примет следующий вид:

$$A = 0{,}5PH. \quad (41)$$

При раздаче с наружным радиальным противодавлением работа деформации определяется по формуле

$$A_п = A + A_т, \quad (42)$$

где $A_т$ — работа, затрачиваемая на преодоление силы контактного трения $P_т$, определяемой по формуле (15). При раздаче по схеме на рис. 20, *б*

$$A_т = P_т(H + H_ц). \quad (43)$$

Наиболее точно работу деформации определяют при использовании диаграммы усилие—путь, автоматически записанной при раздаче; работа деформирования численно равна площади этой диаграммы (находится планиметрированием).

Рекомендации по выбору конструктивной схемы штампа. Выбор конструктивной схемы штампа для раздачи зависит от требуемой величины коэффициента раздачи $K = D_р/D$.

При коэффициенте раздачи меньше предельного при раздаче без радиального противодавления применяют от-

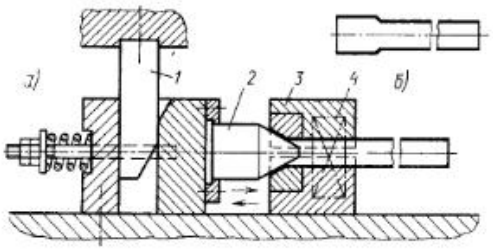


Рис. 29. Конструктивная схема штампа для раздачи с горизонтальным расположением главной оси и клиновым приводом:
1 — клин; *2* — пуансон; *3* — зажимное устройство; *4* — пружина

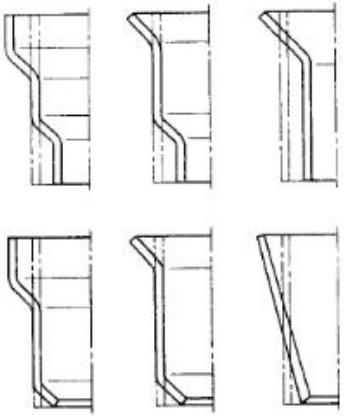


Рис. 30. Типовые детали получаемые раздачей с обжимом

крытые и полузакрытые штампы (рис. 27, *а*, *б*). При K больше предельно допускаемого применяют закрытые штампы с наружным радиальным противодавлением (рис. 28). Особенность этих штампов заключается в том, что обойме, препятствующей выпучиванию заготовки, движение передается толкателями, прикрепленными к верхней плите штампа. Длину толкателей определяют при условии отсутствия пережима заготовки между пуансоном и обоймой.

При необходимости раздачи концевых участков длинных трубчатых заготовок небольшого диаметра (например, деталей гидросистемы двигателя внутреннего сгорания) применяют штампы с горизонтальным расположением главной оси и клиновым приводом (рис. 29). Особенность изготовления такого рода деталей заключается в том, что они штампуются в два перехода: вначале раздачей с малой степенью деформации (при $K = 1{,}1 \div 1{,}2$) получают цилиндрический участок по схеме, показанной на рис. 29, *б*, а затем производят раздачу конусным пуансоном по схеме на рис. 29, *а*. Цилиндрический участок, полученный за первый переход штамповки, препятствует проскальзыванию заготовки относительно зажимов штампа.

Совмещение раздачи и обжима. Сущность процесса заключается в том, что заготовка с двух сторон одновременно деформируется пуансоном для раздачи и матрицей для обжима. В результате обжима происходит уменьшение поперечных размеров заготовки, в результате раздачи — увеличение.

При одновременном обжиме и раздаче зона пластической деформации состоит из двух участков, между которыми находится упругодеформируемая часть заготовки.

Совмещение раздачи с обжимом повышает суммарную критическую степень деформации за один переход штамповки и расширяет возможности формоизменения трубчатых заготовок Типовые детали, полученные раздачей с обжимом в одном штампе, показаны на рис. 30.

Суммарный коэффициент формоизменения равен произведению коэффициента раздачи на коэффициент обжима:

$$K_c = K_p K_{об} = \frac{D_p}{d},$$

где d — наименьший диаметр участка заготовки, деформируемого обжимом; D_p — наибольший диаметр участка заготовки, деформируемого раздачей.

При одинаковой степени деформации и одинаковых углах конусности α пуансона и матрицы сила раздачи примерно на 10 % меньше силы обжима, в связи с чем раздача происходит более интенсивно, чем обжим. Для устранения возможности разрушения кромки заготовки при раздаче в штампе предусматривают упор-съемник или упор в виде ступени на пуансоне, ограничивающий увеличение диаметра заготовки при раздаче.

По данным В. Н. Фролова, при штамповке переходников из трубчатых заготовок с относительной толщиной стенки $s/D = 0{,}045$ для соединения труб разного диаметра получен суммарный коэффициент формоизменения $K_c = 2{,}0$, а при более толстостенной заготовке с $s/D = 0{,}14$ коэффициент $K_c = 2{,}5$ (рис 30).

Совмещение раздачи и обжима наиболее эффективно при изготовлении высоких конических деталей с прямолинейной или криволинейной образующей (рис. 30).

Конструктивная схема штампа для одновременной раздачи и обжима показана на рис. 31.

Пример расчета технологических параметров раздачи. Требуется рассчитать размеры заготовки, выбрать конструктивную схему штампа, определить продольную силу раздачи и работу деформирования, необходимые для изготовления детали, изображенной на рис. 32. Применяем стальную бесшовную горячекатаную трубу диаметром 60 мм со стенкой толщиной 4 мм; временное сопротивление разрыву $\sigma_в = 500$ МПа, предел текучести $\sigma_т = 420$ МПа, деформация в момент начала образования шейки $\varepsilon_ш = n = 0{,}223$.

Относительная толщина стенки $s/D = 4/60 = 0{,}066$, коэффициент раздачи $K = 76{,}6/56 = 1{,}37$.

1. Толщину стенки на кромке деформированной части детали определяем по формуле (29):

$$s_к = 4\sqrt{\frac{56}{76{,}6}} = 3{,}4 \text{ мм}.$$

2. Длину заготовки рассчитываем по формуле (30); при срединных диаметрах $D_p = 80 - 3{,}4 = 76{,}6$ мм, $D = 60 - 4 = 56$ мм и радиусе срединной поверхности тороидного участка детали $r = 8$ мм

$$L = 120 + \frac{76{,}6 + 56 + 2 \cdot 8\,(1 - 0{,}966)}{4 \cdot 56} \times \left(\frac{76{,}6 - 56}{2 \cdot 0{,}258} - 8 \cdot 0{,}131\right) \times$$

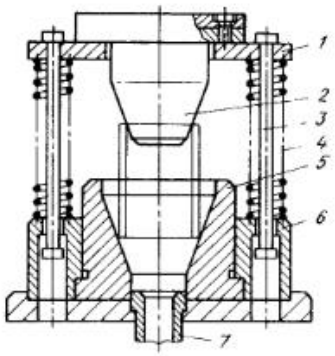


Рис. 31. Конструктивная схема штампа для одновременной раздачи и обжима:
1 — съемник; *2* — пуансон для раздачи; *3* — болт; *4* — пружина; *5* — матрица для обжима; *6* — матрицедержатель; *7* — выталкиватель

$$\times\left(1 + \sqrt{\frac{56}{76}}\right) + \frac{3{,}14 \cdot 8 \cdot 15}{180} =$$

$$= 165 \text{ мм}.$$

3. Предельные коэффициенты раздачи определяем:

а) по условию отсутствия складок, формула (24); $\varphi = 1$ (см. рис. 5):

$$K = \sqrt{\frac{2{,}2 \cdot 420}{500\,(1 + 0{,}1 \cdot 3{,}732) \times (3 - 2 \cdot 0{,}966)} + 1} =$$

$$= 1{,}50;$$

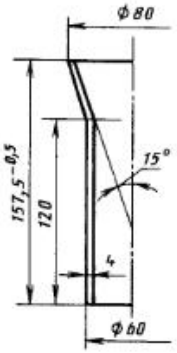


Рис. 32. Чертеж детали, полученной раздачей

б) по условию отсутствия трещин, формула (26):

$$K = \exp\left(0{,}22 + \sqrt{\frac{2\cdot 4}{56}\,0{,}259}\right) = 1{,}51.$$

Наибольший срединный диаметр деформированной части детали по условию «а» составляет $D_p = 56 \cdot 1{,}5 = 84$ мм, по условию «б» $D_p = 56 \times 1{,}51 = 84{,}5$ мм. Получение детали с требуемым диаметром $D_p = 80$ мм возможно в открытом штампе (см. рис. 27, *а*).

4. Продольную силу раздачи определяем по формуле (35) с использованием формулы (21), в которой $2\sqrt{\frac{s}{D_p}}\sin\alpha$ приравниваем нулю, поскольку раздача ведется без выхода заготовки на цилиндрическую часть пуансона. Получаем:

а) по формуле (21)

$$\sigma_{\alpha_0} = \frac{500}{4}\left(\frac{0{,}076}{0{,}056} + 1\right) \times$$

$$\times\left(\frac{0{,}076}{0{,}056} - 1\right)(1 + 0{,}1\cdot 3{,}732) \times$$

$$\times\left(1 + \sqrt{\frac{0{,}056}{0{,}076}}\right)(3 - 2\cdot 0{,}966) =$$

$$= 286{,}5 \text{ МПа};$$

$$P_p = 1{,}2\cdot 3{,}14\,(0{,}060 - 0{,}004)\,0{,}004 \times$$

$$\times 286{,}5 = 0{,}242 \text{ МН} = 242 \text{ кН};$$

б) по формуле (23)

$$\sigma_{\alpha_0} = \frac{500\cdot 1{,}246}{2} \times$$

$$\times\left[\frac{1{,}246\,(0{,}076 - 0{,}056)}{(1{,}246 - 1)\,(0{,}076 + 0{,}056)}\right]^{1{,}246-1} \times$$

$$\times (1 + 0{,}1\cdot 3{,}732)\left(\frac{0{,}076}{0{,}056} - 1\right) \times$$

$$\times\left(1 + \frac{0{,}056}{0{,}076}\right)(3 - 2\cdot 0{,}966) =$$

$$= 265 \text{ МПа};$$

$$P_p = 1{,}2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}056\cdot 0{,}004\cdot 265 =$$

$$= 0{,}223 \text{ МН} = 223 \text{ кН}.$$

5. Работу деформации определяем по приближенной формуле (41), где $H = (D_p^2 - D^2)/4D\sin\alpha$:

$$A = 0{,}5\cdot 250\,(0{,}076^2 - 0{,}056^2)/4 \times$$

$$\times 0{,}056\cdot 0{,}259 = 5{,}423 \text{ кДж}.$$

Расчеты по формуле (39) дают результат примерно на 10 % больше.

Глава 11 СКРУЧИВАНИЕ

Скручивание заготовки в виде стержня круглого сечения. При скручивании сплошного или полого стержня круглого сечения одно поперечное сечение этого стержня поворачивается относительно другого с угловой скоростью $\dot\Omega_z$ (рис. 1) за время t на угол

$$\Omega_z = \int_0^t \dot\Omega_z\,dt. \qquad (1)$$

В результате скручивания материальные прямые, расположенные при $t = 0$ вдоль образующих цилиндрических поверхностей радиусов r и R, превращаются в винтовые линии. Тангенсы углов их наклона к образующим

$$\operatorname{tg}\Omega_\rho(r) = \Omega_z r/l = \omega_z r; \qquad (2)$$

$$\operatorname{tg}\Omega_\rho(R) = \Omega_z R/l = \omega_z R, \qquad (3)$$

где параметр $\omega_z = \Omega_z/l$ представляет собой кручение стержня.

Если металл изотропный и стержень скручивается под действием только крутящего момента, его длина l не изменяется. Поэтому не равна нулю только угловая скорость деформации (рис. 1, *б*):

$$\dot e_{z\theta} = \dot\omega_z\rho/2, \qquad (4)$$

где $\dot\omega_z = \dot\Omega_z/l$ — скорость кручения.

Угловая деформация

$$e_{z\theta} = \omega_z\rho/2. \qquad (5)$$

Для частиц, находящихся на внешней поверхности стержня радиусом R, угловая деформация

$$e_{z\theta}(R) = \omega_z R/2 = (\operatorname{tg}\Omega_\rho(R))/2.$$

Интенсивности скорости деформации и деформации определяют по следующим формулам:

$$\dot e = \dot\omega_z\rho/\sqrt{3}; \qquad (6)$$

$$e = \omega_z\rho/\sqrt{3}. \qquad (7)$$

Касательное напряжение и крутящий момент

$$\sigma_{z\theta} = 3^{-(n+1)/2}A\,(\omega_z\rho)^n; \qquad (8)$$

$$M = 2\pi 3^{-(n+1)/2}(n+3)^{-1}A\omega_z^n \times$$

$$\times\left(R^{n+3} - r^{n+3}\right). \qquad (9)$$

Работа деформации

$$A = 2\pi 3^{-(n+1)/2}(n+1)^{-1} \times$$

$$\times (n+3)^{-1}A\omega_z^{n+1}\left(R^{n+3} - r^{n+3}\right)l, \qquad (10)$$

где A и n — параметры степенной кривой упрочнения металла стержня.

Параметры напряженно-деформированного состояния частиц металла в стенке тонкостенной трубы ($s/\rho_{cp} \leqslant 0{,}2$) в направлении нормали изменяются незначительно (рис. 2). В расчетах принимают их осредненные по этому направлению значения и относят к срединной поверхности трубы радиусом ρ_{cp}. При скручивании на угол Ω_z

$$\operatorname{tg}\Omega_\rho(\rho_{cp}) = \omega_z\rho_{cp}; \qquad (11)$$

$$\dot e_{z\theta} = \dot\omega_z\rho_{cp}/2; \qquad (12)$$

$$e_{z\theta} = \omega_z\rho_{cp}/2; \qquad (13)$$

$$e = \omega_z\rho_{cp}/\sqrt{3}; \qquad (14)$$

$$\sigma_{z\theta} = 3^{-(n+1)/2}A\,(\omega_z\rho_{cp})^n. \qquad (15)$$

Крутящий момент и работу деформации определяют по формулам

$$M = 2\pi 3^{-(n+1)/2}As\rho_{cp}^{n+2}\omega_z^n; \qquad (16)$$

$$A = 2\pi 3^{-(n+1)/2}(n+1)^{-1} \times$$

$$\times As\rho_{cp}^{n+2}\omega_z^{n+1}l. \qquad (17)$$

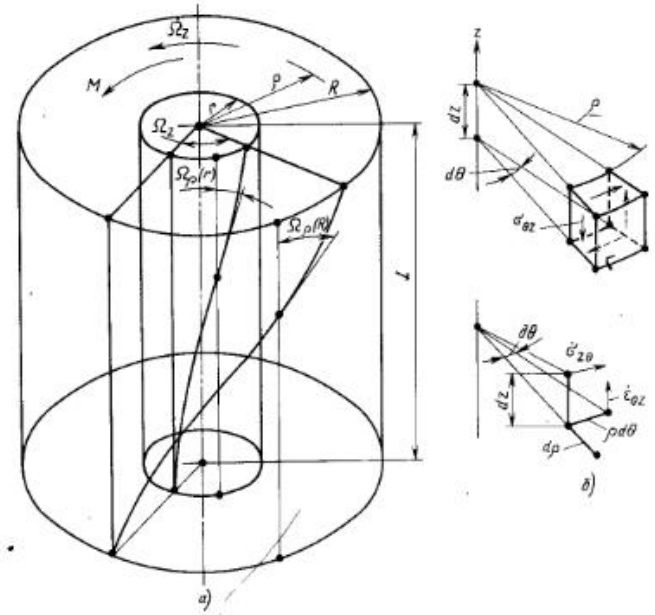


Рис. 1. Скручивание заготовки в виде полого стержня круглого сечения: *а* — расчетная схема; *б* — схема напряженно-деформированного состояния

Скручивание стержня круглого сечения ограничено разрушением металла, возникающим по достижении интенсивностью деформации [(см. 7 и 14)] значения ε_p. Предельное значение угла наклона винтовой линии,

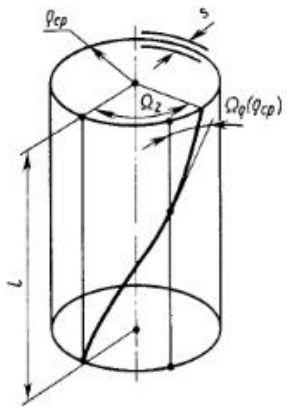


Рис. 2. Схема скручивания тонкостенной трубы

лежащей на поверхности стержня радиусом R (или на срединной поверхности радиусом $\rho_{ср}$ для стержня в виде тонкостенной трубки),

$$\Omega_\rho(R)_п = \operatorname{arctg}(\sqrt{3}\,\varepsilon_p),$$

$$\Omega_\rho(\rho_{ср})_п = \operatorname{arctg}(\sqrt{3}\,\varepsilon_p). \quad (18)$$

Значение ε_p определяют с помощью зависимости $\varepsilon_p^c(\sigma_0/\sigma)^c$ пластичности металла стержня. Для процесса скручивания стержня круглого сечения под воздействием только крутящего момента координата σ_0/σ точки на кривой этой зависимости равна нулю. Поэтому согласно степенной аппроксимации кривой пластичности [см. гл. 1, формула (8)] $\varepsilon_p \approx 2\varepsilon_{p.p}$, где $\varepsilon_{p.p}$ — деформация разрушения металла в шейке образца при испытании металла на одноосное растяжение.

Скручивание заготовки в виде стержня квадратного сечения (правильной четырехгранной призмы). На скрученной четырехгранной призме ее первоначально прямые ребра располагаются

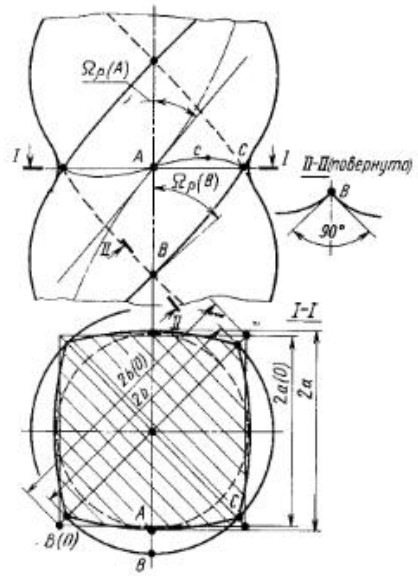


Рис. 3. Скручивание заготовки в виде стержня квадратного сечения

по винтовым линиям, лежащим на цилиндрической поверхности радиусом b (рис. 3). При перемещении материальной точки B ребра из своего начального положения B (0) (рис. 4) она остается в нормальной плоскости. При закручивании на угол Ω_z угол наклона винтовой линии к образующей цилиндра радиусом b

$$\Omega_\rho(B) = \operatorname{arctg}\omega_z b, \quad (19)$$

где ω_z — кручение представлено в формуле (3).

Первоначально прямая осевая материальная линия каждой грани также располагается по винтовой линии, лежащей на цилиндрической поверхности радиусом a. Угол наклона этой винтовой линии

$$\Omega_\rho(A) = \operatorname{arctg}\omega_z a. \quad (20)$$

Четырехгранную призму можно представить в виде тела, состоящего из цилиндра радиусом a (0) и четырех-, трехгранных призм, одна грань которых является цилиндрической. Схематически можно рассматривать формоизменение каждой составляющей части, принимая, что граничная цилиндрическая поверхность остается цилиндрической. При скручивании тела в целом оно превращается в четырехзаходный винт. Высота его витка равна разности $b-a$. По мере увеличения угла Ω_z закручивания длина витков увеличивается приблизительно в $1/\cos\Omega_\rho(B)$ раз (при измерении по вершине витка). Необходимая при этом сила растяжения витков передается на них со стороны цилиндра радиусом a. Цилиндр сжимает сила такой же величины, в результате чего его длина немного сокращается, а поперечное сечение несколько увеличивается (см. рис. 3).

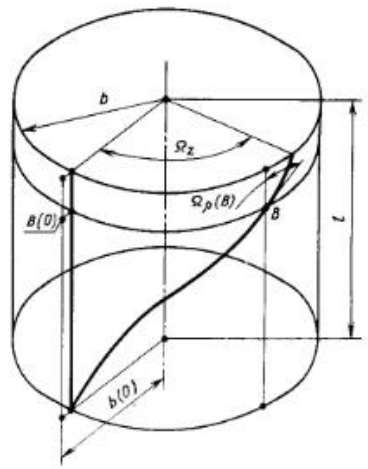


Рис. 4. Схема перемещения материальной точки, находящейся на ребре стержня квадратного сечения

Материальное поперечное сечение стержня не остается плоским. Так, прямая риска, нанесенная поперек грани, в процессе скручивания стержня изгибается (см. рис. 3, линия AcC). Наибольшее искривление сечения имеет место в витках, т. е. за пределами круга радиусом a. Искривление при этом охватывает и приграничную область этого круга. Но круг, очерченный радиусом, равным приблизительно 0,8 a, остается практически плоским

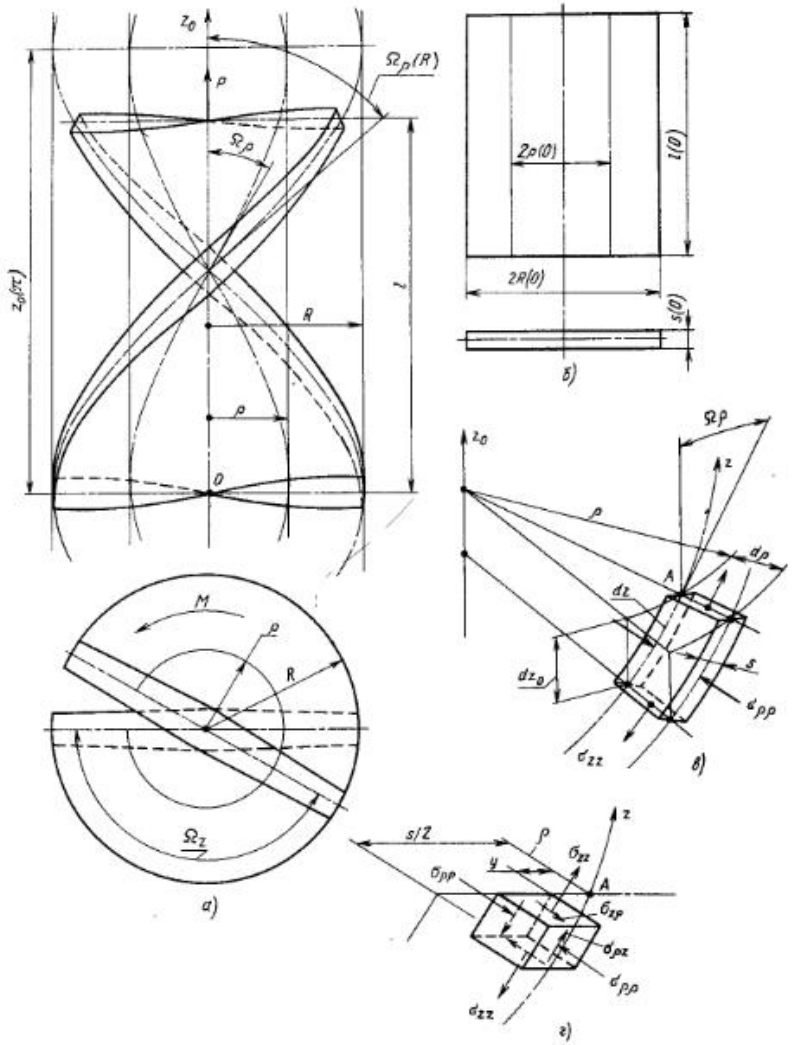


Рис. 5. Скручивание относительно тонкой полосы:
а — расчетная схема; *б* — начальные размеры полосы; *в* — элемент скрученной полосы; *г* — схема к сравнительной оценке касательного напряжения

Крутящий момент определяют по формуле

$$M \approx 8 \cdot 3^{-(n+1)/2} A\,(n+3)^{-1}\,\omega_z^n a^{n+3}, \qquad (21)$$

где принимают $a = a\,(0)$; $\omega_z = \Omega_z/l\,(0)$.

Разрушение металла по исчерпании его пластичности возникает на вершинах витков. Предельный угол $\Omega_\rho\,(A) = \Omega_\rho\,(A)_\text{п}$ наклона винтовой линии, лежащей на цилиндрической поверхности радиусом a, составляет приблизительно $(0{,}8—0{,}9)\ \Omega_\rho\,(R)_\text{п}$.

Скручивание относительно тонкой полосы при неизменной длине. При скручивании относительно тонкой полосы ее срединная плоскость превращается в винтовую поверхность (рис. 5). Материальные линии срединной плоскости полосы, расположенные от оси вращения на расстоянии $\rho\,(0)$ (рис. 5, *б*), превращаются в винтовые линии, лежащие на цилиндрических поверхностях радиусом ρ (рис. 5, *а*). Расстояние $\rho < \rho\,(0)$, т. е. в процессе скручивания линия приближается к оси.

Угол наклона винтовой линии к образующей цилиндрической поверхности

$$\Omega_\rho = \operatorname{arctg} \omega_z \rho, \qquad (22)$$

где ω_z — кручение [см. формулу (3)].

Отношение длины материальной винтовой линии к начальной длине при неизменной длине полосы $[l = l\,(0)]$ равно отношению (рис. 5, *в*)

$$dz/dz_0 = 1/\cos\Omega_\rho. \qquad (23)$$

Деформация удлинения винтовой линии

$$\varepsilon_z = \ln\,(1/\cos\Omega_\rho). \qquad (24)$$

Две другие деформации — в направлении нормали к винтовой поверхности и в направлении радиального луча — соответственно равны:

$$\varepsilon_n = \ln\,[s/s\,(0)]; \qquad (25)$$

$$\varepsilon_\rho = \ln\,[d\rho/d\rho\,(0)]. \qquad (26)$$

Толщина образовавшегося из полосы винта непостоянна вдоль его поперечного сечения. Наименьшая толщина имеет место на кромках винта при $\rho = R$. Если металл изотропный, здесь выполняется равенство $\varepsilon_n = \varepsilon_\rho$, поскольку $\sigma_\rho = 0$ (внешняя сила на кромках не действует). Поэтому толщина винта на его кромках

$$s = s\,(0)\cos^{1/2}\Omega_\rho\,(R).$$

Полученная экспериментально картина распределения деформаций по сечению винта представлена на рис. 6. Металл образца был анизотропным ($r_\text{ср} = 1,2$), поэтому при $\rho < R\varepsilon_n < \varepsilon_\rho$. Деформации в частицах, расположенных по оси винта, $\varepsilon_n > 0$, $\varepsilon_\rho < 0$. Это результат воздействия

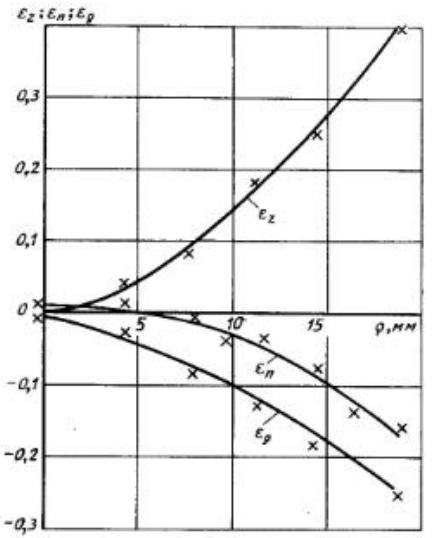


Рис. 6. Распределение деформаций по сечению скрученной полосы $(\Omega_\rho\,(R) = 46°)$

сжимающего напряжения σ_ρ, поэтому толщина винта по оси несколько больше исходной.

Деформация по отношению к углу между координатными линиями z и ρ (см. рис. 5, *г*)

$$\varepsilon_{z\rho} = \omega_z y.$$

На срединной винтовой поверхности угловая деформация равна нулю; наибольшего значения деформация достигает в приповерхностном слое $(y = s/2)$. Осредненное по направлению нормали к винтовой поверхности значение деформации

$$\varepsilon_{z\rho}^\text{ср} = s\omega_z/2$$

соизмеримо с деформацией ε_z, определяемой по формуле (24), только для частиц срединной винтовой поверхности, расположенных вблизи от оси вращения, и на порядок меньше для частиц, отдаленных от оси на расстояние $\rho > 5s$. Поэтому в расчетах процесса скручивания относительно тонкой полосы угловой деформацией и касательным напряжением $\sigma_{z\rho}$

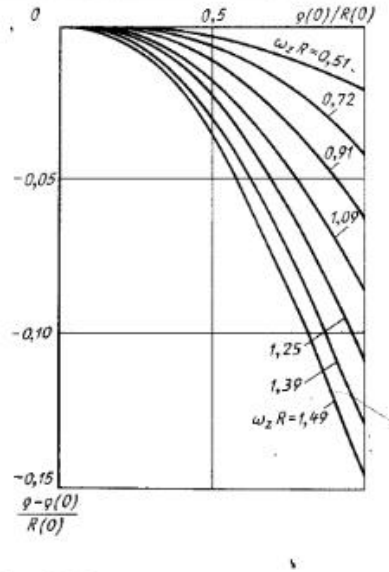


Рис. 7. Зависимость относительного перемещения материальной точки от ее относительной начальной координаты

(рис. 5, *г*) пренебрегают. Нормальные напряжения считают главными ($\sigma_{zz} = \sigma_z$, $\sigma_{\rho\rho} = \sigma_\rho$); принимают, что частицы находятся в плоском напряженном состоянии. Напряжения σ_ρ возникают от того, что растянутые винтовые слои, поперечное сечение которых равно sdp, искривлены и надавливают друг на друга.

Технологические параметры, полученные в численном решении уравнений теории пластичности, записанных

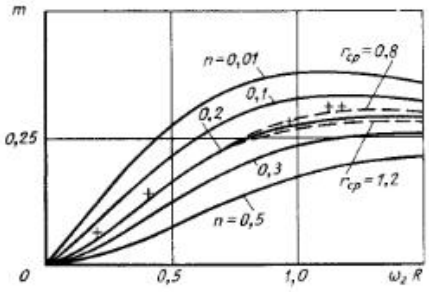


Рис. 8. Зависимость безразмерного крутящего момента m при скручивании полосы от параметра ее формоизменения $\omega_z R$

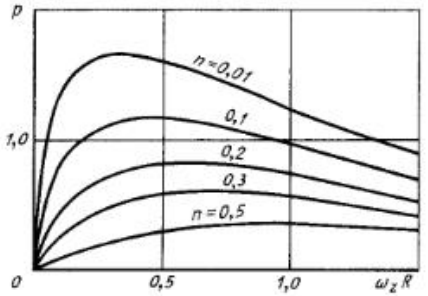


Рис. 9. Зависимость безразмерной продольной силы p возникающей при скручивании полосы с неизменной длиной от параметра ее формоизменения $\omega_z R$

с отмеченным упрощением, представлены на графиках (рис. 7—9).

На рис. 7 представлена зависимость относительного перемещения $[\rho - \rho(0)]/R(0)$ материальной точки срединной поверхности винта от ее относительной начальной координаты $\rho(0)/R(0)$ для различных значений параметра $\omega_z R$. Как показали результаты расчетов, параметры кривой упрочнения практически не влияют на эту зависимость.

На рис. 8 представлен безразмерный крутящий момент $m = M/AR^2(0)\,s(0)$ в виде функции параметра $\omega_z R$ для различных значений параметра n кривой упрочнения. Для значения $n = 0{,}2$ штриховой линией показаны кривые, полученные с учетом влияния анизотропии.

На рис. 9 показана зависимость безразмерной продольной силы $p = P/AR(0)\,s(0)$ от параметра формоизменения $\omega_z R$.

Возможности формоизменения при скручивании полосы из достаточно пластичного металла ($n > 0{,}2$; $\varepsilon_{p.p} > 3n$) ограничивают два явления: потеря устойчивости от силы поперечного сжатия, вызываемой напряжением σ_ρ, и локализация скручивания.

Устойчивость относительно тонкого винта от силы поперечного сжатия зависит в основном от параметра $R(0)/s(0)$ поперечного сечения. Потеря устойчивости заключается в том, что при критическом значении параметра $\omega_z R$ начинается ускоренное

нарастание прогиба в некоторых поперечных сечениях винта, завершающееся внезапным складыванием участка витка протяженностью приблизительно $0{,}7\ z_0(\pi)$ (см. рис. 5, *а*).

Приближенные опытные данные о предельном значении параметра $\omega_z R = (\omega_z R)_п$ для винтов, имеющих длину $l = l(0)$ не менее $2z_0(\pi)$, следующие:

$R(0)/s(0)$	10	12	16	20	24
$(\omega_z R)_п$	1,1	0,9	0,6	0,4	0,3

Локализация скручивания наблюдается при $R(0)/s(0) < 8$. Она связана с точкой максимума кривой $m(\omega_z R)$ (см. рис. 8). Период процесса скручивания, который соответствует приближению к точке максимума на этой кривой, характеризуется увеличением неравномерности распределения кручения ω_z по винту. Точке максимума соответствует начало локального скручивания винта на участке протяженностью $(3 \div 4)\ R$. На других участках винта происходит разгрузка, скручивание прекращается.

Максимум на кривой $p(\omega_z R)$ не оказывает влияния на развитие локализации, так как сила продольного растяжения необходима только для того, чтобы выполнялось условие неизменности продольного размера винта.

Формоизменение полосы при скручивании может ограничивать и разрыв металла на кромке, если металл не обладает достаточной пластичностью. При испытании на одноосное растяжение такого металла на образце перед тем, как произойдет его разрушение, шейка не образуется или же период растяжения металла в шейке невелик ($\varepsilon_{p.p} < 1{,}2n$). В этом случае предельное значение угла Ω_ρ (см. рис. 5, *а*) можно определить по формуле

$$\Omega_\rho(R)_п = \arccos[\exp(-\varepsilon_{p.p})].$$

Глава 12 РОТАЦИОННАЯ ВЫТЯЖКА

Ротационная вытяжка представляет собой процесс формоизменения плоских или полых вращающихся заготовок по профилю оправки с помощью перемещающейся деформирующей нагрузки. Процесс характерен наличием локального очага деформации, образующегося в результате воздействия давильного элемента (ролика) на материал заготовки. Реализация локализованной деформирующей нагрузки при ротационной вытяжке позволяет получать за один проход высокие степени деформации (до 80 %), что делает процесс экономически выгодным по сравнению с другими способами изготовления деталей, например штамповкой. С помощью ротационной вытяжки получают полые детали с постоянной и переменной толщиной стенки, имеющие широкий диапазон размеров (диаметром до 5 м, толщиной стенки до 40 мм и длиной до нескольких метров) и различной формы. Ротационную вытяжку можно успешно использовать для обработки как обычных сталей и сплавов, так и труднодеформируемых и тугоплавких материалов.

Возможность изменения в широких пределах геометрических параметров рабочего профиля деформирующего элемента (ролика) в сочетании с оптимальными режимами обработки позволяет регулировать качество изделий и получать высокую размерную точность и низкую шероховатость поверхности.

Практическое применение ротационной вытяжки дает возможность значительно снизить объем первоначальных затрат на приобретение оборудования, изготовление инструмента и оснастки, по сравнению с другими видами обработки, в частности глубокой вытяжки на прессах, и позволяет эффективно использовать указанный метод в мелко- и среднесерийном производствах крупногабаритных деталей сложной формы.

1. РОТАЦИОННАЯ ВЫТЯЖКА НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Применение той или иной схемы ротационной вытяжки наряду с выбором рабочего инструмента (геометрии ролика) в значительной мере определяет качество получаемых деталей. Схемы ротационной вытяжки отличаются способами базирования деталей и траекторией перемещения инструмента.

При ротационной вытяжке конических деталей и деталей с криволинейной образующей, имеющих отношение длины детали к диаметру $L/D \leqslant 2$, для легких и средних работ используются преимущественно одноролико вые станки. На рис. 1, *а* показана схема ротационной вытяжки конических деталей с утонением стенки по закону синуса из плоской заготовки с толщиной стенки

$$h = H \sin \alpha, \qquad (1)$$

где H — толщина заготовки; α — угол наклона образующей конуса к его оси.

Особенность формоизменения по закону синуса состоит в том, что диаметр исходной заготовки остается постоянным в любой стадии формоизменения. Поэтому для правильного ведения процесса ротационной вытяжки необходимо, чтобы перемещение ролика производилось строго параллельно образующей конуса оправки на заданном от нее расстоянии, определяемом зазором $z = h$, т. е.

$$z = H \sin \alpha. \qquad (2)$$

Отсюда определяем исходную толщину заготовки

$$H = h/\sin \alpha. \qquad (3)$$

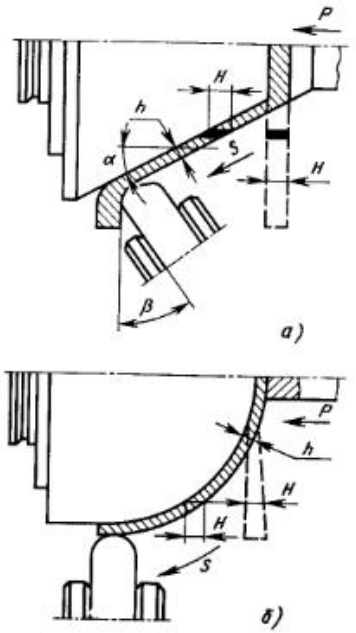


Рис. 1. Схемы ротационной вытяжки оболочек с конической (*а*) и криволинейной (*б*) образующей:
S — направление подачи

Схема (см. рис. 1, *а*) может быть рекомендована для получения за один проход конических деталей с минимальным углом конусности $2\alpha \geqslant 30°$. При изготовлении конических деталей с меньшими углами в качестве исходной заготовки используют предварительно полученный конус (например, по вышеописанному способу). Утонение стенки конуса в процессе вытяжки

$$h_2 = H \sin \alpha_1 \sin \alpha_2, \qquad (4)$$

где α_2 — угол наклона образующей готовой детали.

По схеме (см. рис. 1, *б*) могут быть также получены детали с криволинейной образующей из кружка толщиной H. В этом случае толщина стенки детали в данной точке будет зависеть от угла наклона касательной в этой точке к оси детали. В каждой конкретной точке

$$h_i = H \sin \alpha_i, \qquad (5)$$

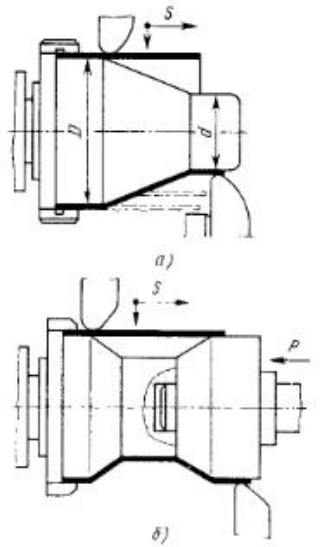


Рис. 2. Схема ротационной вытяжки оболочек типа воронки с одним (*а*) и двойным (*б*) конусом

где α_i — угол наклона образующей в данной точке.

Аналогичным образом с обеспечением зависимости (5) могут быть получены конические детали с переменной толщиной стенки или детали с криволинейной образующей и постоянной толщиной стенки, если в качестве заготовки будет использован кружок с расчетной переменной толщиной стенки (см. рис. 1, *б*). Сферические детали могут быть получены при траектории перемещения ролика по дуге окружности заданного радиуса с помощью поворотного суппорта.

Ротационная вытяжка по схемам (рис. 2, *а* и *б*) предусматривает использование заготовок в виде мерной трубы. По схеме (см. рис. 2, *а*) изготовляют детали типа воронки с числом проходов, зависящим от разницы диаметров $D - d$, толщины материала и его свойств. По схеме (см. рис. 2, *б*) изготовляют детали с двойным конусом на двух оправках, одна из которых имеет возможность перемещаться вдоль оси (рис. 2, *б*). Траектория перемещения деформирующих роликов в обоих случаях аналогична схемам, приведенным на рис. 1.

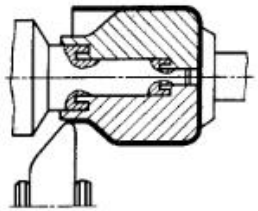


Рис. 3. Схема ротационной вытяжки по обжиму концевой части заготовки

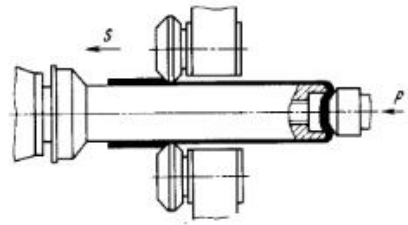


Рис. 5. Схема ротационной вытяжки роликами с открытой калибровкой

Ротационная вытяжка по схеме, показанной на рис. 3, предусматривает обжим концевой части заготовки, осуществляемый на составной оправке. По схеме (рис. 4) изготовляют детали типа рефлектора и аналогичные им. Плоская заготовка формоизменяется за несколько последовательных проходов, что является недостатком этой схемы. В отличие от схем получения конических деталей и деталей с криволинейной образующей, ротационная вытяжка цилиндрических оболочек осуществляется, как правило, тремя равномерно расположенными (под углом 120°) по периметру изделия роликами. Цель применения трех роликов состоит в уравновешивании значительных усилий, возникающих в процессе вытяжки, для получения качественных деталей. Наряду с трехроликовыми могут быть использованы двух- и четырехроликовые станки.

Ротационную вытяжку цилиндрических оболочек можно осуществлять прямым и обратным способами, отличающимися направлением течения материала по отношению к направлению осевой подачи деформирующего ролика. При обратном способе вытяжки можно получать цилиндрические оболочки с длиной в несколько раз большей, чем длина оправки. Однако точность получаемых деталей в этом случае оказывается низкой, в связи с чем на практике большее применение имеет прямой способ ротационной вытяжки.

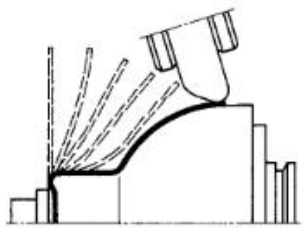


Рис. 4. Схема изготовления деталей типа рефлектора

В зависимости от применяемого типа роликов, их взаимного расположения и перемещения для получения цилиндрических деталей с постоянной и переменной толщиной стенки используют следующие схемы.

На рис. 5 показана схема ротационной вытяжки роликами с открытой калибровкой (см. табл. 5, тип Е, Ж). Ролики устанавливают в одной плоскости, перпендикулярной к оси оправки, на одинаковом от нее расстоянии, равном толщине стенки готовой детали ($z = h$). Такую схему применяют для получения широкого диапазона деталей с различными отношениями L/D и H/D. Однако для получения высокого качества оболочек необходим тщательный подбор рабочих размеров деформирующих роликов и режимов обработки при сохранении высокой производительности процесса. Так, например, для обеспечения высокой производительности процесс следует вести с большими продольными подачами, что приводит к образованию наплыва материала перед фронтом роликов и ухудшению получаемой поверхности. Величину наплыва можно уменьшить за счет уменьшения рабочего угла ролика $\alpha_р$, что, в свою очередь, приводит к увеличению диаметра детали.

Снижение продольной подачи уменьшает производительность процесса, т. е. ухудшает его технико-экономические показатели. Таким образом, указанная взаимосвязь геометрических параметров деформирующих роликов и режимов с одной стороны, производительность и качественные характеристики детали — с другой, ограничивают область применения ротационной вытяжки по указанной схеме для получения цилиндрических оболочек с высокой размерной точностью и низкой шероховатостью поверхности.

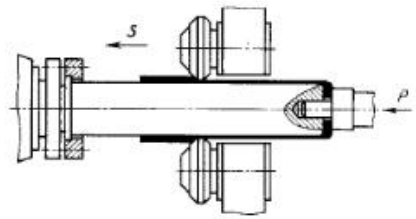


Рис. 6. Схема ротационной вытяжки роликами с калибровкой

Схема (рис. 6) предусматривает использование роликов с калибровкой (см. табл. 5, тип *3*), что позволяет вести процесс вытяжки с большими продольными подачами, исключая образование наплыва. Как и в схеме, показанной на рис. 5, установку роликов по схеме на рис. 6 осуществляют в одной плоскости с зазором $z = h$. Ротационная вытяжка по этой схеме обеспечивает получение высокой размерной точности и качества поверхности при достаточной производительности. Недостатком рассмотренной схемы является ограничение утонения стенки заготовки, уменьшить которую можно на величину, соответствующую высоте l гребня ролика (см. табл. 5). В связи с этим схему, показанную на рис. 6, применяют для изготовления гладких цилиндрических деталей и деталей с утолщениями, равными толщине исходной заготовки.

Для получения деталей с утолщениями на различных участках меньшего размера, чем стенка исходной заготовки, может быть рекомендована схема (рис. 7), отличающаяся двухрядным расположением деформирующих роликов (двумя блоками). Ролики переднего блока устанавливают с зазором $z = h_1$, а ролики второго блока с $z = h_2$.

На рис. 8 приведена схема, в соответствии с которой ролики располагаются попарно друг против друга через 90° по периметру заготовки в одной плоскости. Для работы могут быть использованы деформирующие элементы типа Е, Ж, И или К (см. табл. 5). При этом ролики типа Е, Ж являются рабочими, а вторая пара — типа К — поддерживающие, они препятствуют образованию наплыва при работе роликов типа Е, Ж, И.

Схема, показанная на рис. 8, универсальна; она обеспечивает получение довольно высокой размерной точности и высокой производительности. На рис. 9 представлены схемы ротационной вытяжки с разделением суммарного очага деформации. Рабочие ролики устанавливаются со смещением в осевом направлении относительно друг друга, образуя различную величину зазора, таким образом, чтобы больший зазор был у первого ролика, а у последующего $z_п = h$. В зависимости от величины смещения роликов различают схемы с образованием прерывистого очага деформации (см. рис. 9, *а*) и непрерывного очага деформации (см. рис. 9, *б*). В последнем случае предыдущий ролик перекрывает своим про-

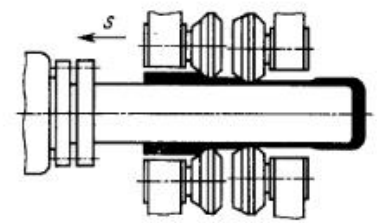


Рис. 7. Схема ротационной вытяжки с двухрядным расположением роликов

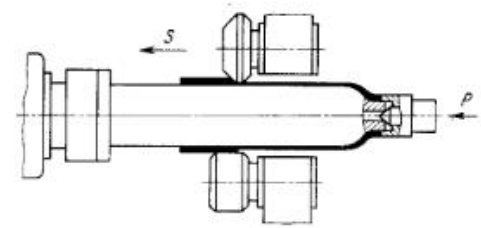


Рис. 8. Схема ротационной вытяжки роликами расположенными через 90°

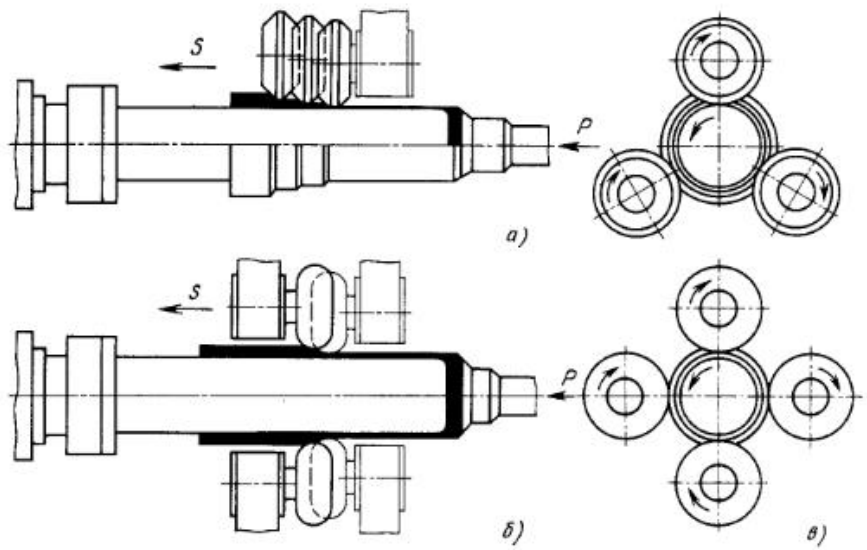


Рис. 9. Схема ротационной вытяжки с разделением очага деформации:
а — прерывистый очаг деформации; *б* — непрерывный очаг деформации

филем зону деформации последующего ролика, препятствуя образованию наплыва.

С помощью схемы, показанной на рис. 9, *а*, изготовляют цилиндрические детали из высокопрочных материалов. Работа ведется с помощью роликов типа Е, И и Ж (см. табл. 5). По схеме на рис. 9, *б* обрабатывают легкодеформируемые заготовки с помощью роликов типа Е, Ж. Если используется мощное специализированное оборудование, где возможна реализация больших степеней утонения, вытяжку можно вести по схеме, показанной на рис. 9, *б*, с применением радиусных роликов типа И.

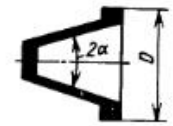
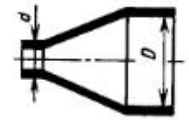
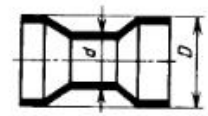
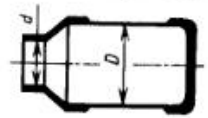
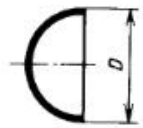
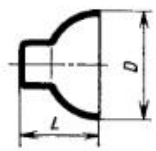
Использование схем на рис. 9 позволяет увеличить степень деформации за один проход, снизить деформирующее усилие по сравнению с другими схемами и получать высокую размерную точность.

В табл. 1 и 2 приведена классификация конических деталей, деталей с криволинейной образующей, а также цилиндрических деталей с указанием схем ротационной вытяжки, используемых для их изготовления.

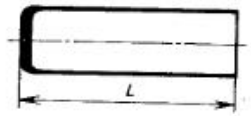
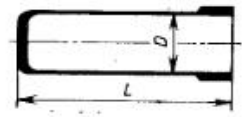
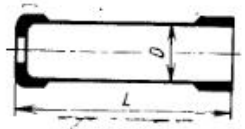
Выбор и расчет заготовок. Существенное влияние на трудоемкость и экономическую эффективность процесса ротационной вытяжки оказывает выбор оптимальной заготовки. Как правило, в качестве исходной заготовки для процесса вытяжки используют листовой прокат, горяче- и холоднокатаные трубы. В табл. 3 приведены характеристики заготовок для получения оболочек различной формы и размеров.

Для уменьшения затрат длина заготовки должна быть минимальной при соответствующей толщине стенки, выбираемой в пределах $H = (2 \div 4)\,h$ так, чтобы иметь возможность вести процесс вытяжки без промежуточной термической обработки. Не рекомендуется принимать толщину стенки заготовки $H < 1{,}5\,h$, так как в дальнейшем обнаруживается неоднородность структуры по всей толщине стенки готовой детали, более упрочненными оказываются верхние слои металла. Заготовки для получения конических деталей и деталей с криволинейной образующей преимущественно имеют форму круга, диаметр которого оп-

1. Типы деталей конических и с криволинейной образующей

Тип	Деталь	Эскиз	Рекомендуемая схема изготовления по рисунку
I	Коническая с фланцем		1, *а*
II	Коническая с открытыми цилиндрическими участками		2, *а*
III	С двойным конусом		2, *б*
IV	Цилиндрическая с дном и горловиной		3
V	Полусфера		1, *б* 4
VI	Типа рефлектора		4

2. Типы цилиндрических деталей, получаемых ротационной вытяжкой

Тип	Детали	Эскиз	Рекомендуемая схема изготовления по рисунку
I	Гладкие цилиндрические с закрытой концевой частью		5 6 8 9, *а*, *б*
II	Цилиндрические с дном и концевым утолщением		5 6 8 9, *а*, *б*
III	Цилиндрические с двумя концевыми утолщениями		5 7 8
IV	Цилиндрические с концевыми и промежуточными утолщениями переменной толщины		5 8
V	Цилиндрические с горловиной		5 7 8
VI	Цилиндрические с продольным сварным швом и открытыми концевыми частями		5 6 8 9, *а*, *б*

3. Характеристики заготовок для получения деталей ротационной вытяжкой

Детали	L/D	Рекомендуемый тип заготовки, метод ее получения		
		$D < 150$ мм	$D < 400$ мм	$D > 400$ мм
Цилиндрические с постоянной и переменной толщиной стенки с закрытой концевой частью (см. табл. 2)	До 1	Кружок или штампованная из кружка цилиндрическая заготовка	Штампованная из кружка заготовка	Штампованная из кружка заготовка
	До 5	Штампованная из кружка цилиндрическая заготовка	То же	Штампованная из кружка заготовка или сварная заготовка, свернутая из листа с приваренным дном
	Св. 5	Заготовка, полученная глубокой вытяжкой из кружка	Заготовка, полученная из кружка глубокой вытяжкой	Заготовка, полученная глубокой вытяжкой, или сварная заготовка из листа с приваренным дном
Цилиндрические с постоянной и переменной толщиной стенки с открытыми концевыми частями (см. табл. 2)	До 1	Трубы горяче- и холоднокатаные, прессованные	Трубы горяче- и холоднокатаные, прессованные	Сварные из листа заготовки
	До 5	Трубы горяче- и холоднокатаные	То же	То же
	Св. 5	Трубы горяче- и холоднокатаные, прессованные	То же	То же
Конические с криволинейным профилем с закрытой концевой частью (см. табл. 1)	До 1	Кружок		
	Св. 1	Цилиндрическая, коническая заготовка, кружок или заготовка чашеобразной формы, полученные штамповкой или ротационной вытяжкой	Коническая заготовка, кружок или заготовка чашеобразной, цилиндрической формы, полученные штамповкой или ротационной вытяжкой	Коническая, цилиндрическая заготовка или заготовки, полученные штамповкой или ротационной вытяжкой

Продолжение табл. 3

Детали	L/D	Рекомендуемый тип заготовки, метод ее получения		
		$D < 150$ мм	$D < 400$ мм	$D > 400$ мм
Конические с криволинейным профилем, с открытыми концевыми частями (см. табл. 1)	До 5	Трубы горяче- и холоднокатаные, прессованные	Трубы горяче- и холоднокатаные, прессованные	Сварные из листа цилиндрические заготовки

ределяют исходя из равенства площадей поверхностей заготовки и готовой детали (с учетом припуска на обрезку):

$$D = 1{,}13\sqrt{F} = 1{,}13\sqrt{\sum_{i=1}^{n} F_i}, \quad (6)$$

где F — поверхность готовой детали; F_i — площадь отдельных элементов поверхности детали.

Припуск на обрезку составляет 4—10 % длины готовой детали. По формуле (6) определяют размер заготовки и в случае ротационной вытяжки цилиндрических деталей без утонения стенки.

При расчете размеров заготовки для ротационной вытяжки цилиндрических деталей с утонением стенки используют метод равенства объемов. Для простой цилиндрической детали

$$D = \sqrt{d_{ср}^2 + 4d_{ср}(L + \Delta L)h/H}, \quad (7)$$

где $d_{ср}$ — диаметр детали по средней линии; L — длина детали; ΔL — припуск под обрезку; $\Delta L = 6 \div 16$ %. Верхние значения принимают для меньших соотношений L/D.

Длина цилиндрических заготовок для вытяжки гладких цилиндрических деталей с утонением стенки

$$L_0 = \frac{L_д(d+h)h}{(d+H)H} + \Delta L. \quad (8)$$

При ротационной вытяжке цилиндрических деталей с переменной толщиной стенки длина заготовки

$$L_0 = \frac{l_1(d+h_1)h_1 + l_2(d+h_2)h_2 + \cdots + l_n(d+h_n)}{(d+H)H} + \Delta L. \quad (9)$$

Диаметр заготовки определяется размером оправки $d_{опр}$, зазором z между оправкой и стенками заготовки и толщиной стенок заготовки:

$$D_0 = d_{опр} + z + 2H. \quad (10)$$

Для заготовок, полученных механической обработкой, $z = 0{,}05 \div 0{,}5$ мм, а для заготовок, полученных без механической обработки, $z = 0{,}3 \div 1{,}2$ мм. Важную роль в обеспечении точности готовой детали играет исходная разностепенность заготовок, величина которой диктуется требованиями, предъявляемыми к детали. При однопроходном процессе ротационной вытяжки разностенность заготовки не должна более, чем в 1,5 раза превышать разностенность детали, заданную чертежом. При многопереходном процессе допускается увеличение разностенности исходной заготовки, но не более чем в 2 раза превышающей разностенность готовой детали.

Инструмент для ротационной вытяжки на специализированном оборудовании. В качестве рабочего инструмента при ротационной вытяжке используют деформирующие ролики и оправки. Форма и диаметр оправки должны соответствовать форме и внутреннему диаметру получаемой детали. Рабочий профиль роликов принимают в зависимости от типа изготовляемой детали и ее материала, схемы процесса и конструктивных особенностей оборудования.

Для изготовления роликов и оправок используют преимущественно углеродистые и легированные инструментальные стали марок У10А, Р9, Р18 и др., обеспечивающие после закалки и отпуска твердость HRC 56—62. При формоизменении легкодеформируемых материалов оправки допускается изготовлять из сталей марок 45, 40Х, У7, У8, 5ХНВ, чугунов СЧ 20, СЧ 25 и др.

В зависимости от размеров и формы изготовляемых деталей оправки могут быть сплошными, полыми и составными Для деталей диаметром менее 250 мм оправки изготовляют сплошными, а для бо́льших диаметров — полыми. Может быть использована составная оправка, сплошная или полая, состоящая из двух частей. В этом случае рабочую часть оправки изготовляют из легированной стали, а ее крепежную часть из обычных углеродистых сталей. В целях обеспечения нормального съема готовой детали с оправки при изготовлении деталей с дном и горловиной, оправку делают составной. При этом максимальный диаметральный размер в радиальном направлении каждого элемента должен быть меньше минимального диаметрального размера горловины готовой детали. Посадочное место оправок должно соответствовать посадочному месту шпинделя станка, а биение оправки не должно превышать 0,05 мм. Диаметральные размеры оправок:

для детали, сопрягающейся по наружному диаметру,

$$d_{опр} = (d_н - \Delta')_{-\delta_п}; \quad (11)$$

для детали, сопрягающейся по внутреннему диаметру,

$$d_{опр} = (d_н + \Delta')_{-\delta_п}, \quad (12)$$

где $d_н$ — номинальный размер наружного (11) и внутреннего (12) диаметров;

Δ' — припуск на износ оправки; $\delta_п$ — допуск на изготовление оправки по 6—8 квалитету точности. Шероховатость поверхности оправки должна быть до $Ra \leqslant 0{,}32$ мкм.

В зависимости от формы изготовляемых деталей, принятых схем ротационной вытяжки и конструкционных особенностей оборудования используются различные типы роликов.

В табл. 4 приведены основные геометрические параметры роликов, используемых для ротационной вытяжки конических деталей и деталей с криволинейной образующей.

При ротационной вытяжке таких деталей ролики в державках устанавливают под углом β. При этом фактические углы рабочей и задней поверхности ролика будут: $\alpha_{р.ф} = \alpha_р + \beta$ и $\alpha_{з.ф} = \alpha_з - \beta$, если ролик наклонен по направлению подачи, и $\alpha_{р.ф} = \alpha_р - \beta$ и $\alpha_{з.ф} = \alpha_з + \beta$, если наклон ролика выполнен в сторону, противоположную направлению подачи.

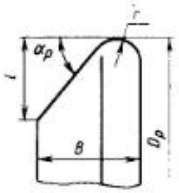
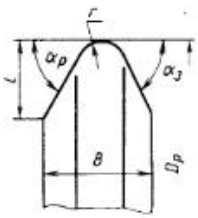
Высоту конуса l роликов выбирают для деталей с фланцем в зависимости от высоты флаица

$$l = (h_ф + 5).$$

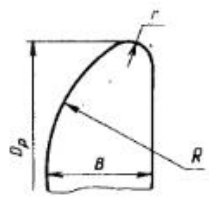
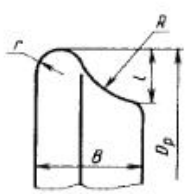
Следует иметь в виду, что при выборе рабочего и вспомогательных углов ролика $\alpha_р$, $\alpha_з$, а также угла разворота β необходимо, чтобы в процессе работы между профилем детали и рабочими поверхностями ролика обеспечивался угол 5—18°.

В табл. 5 приведены геометрические параметры роликов, применяемых для изготовления цилиндрических деталей. Ролики, применяемые для обработки цилиндрических деталей, имеют двойной конус. Для роликов типа Е угол рабочей поверхности $\alpha_р = 20 \div 30°$ в случае ротационной вытяжки материалов с большим значением $\sigma_в$. Для мягких, легкодеформируемых материалов (алюминиевые сплавы, низкоуглеродистые стали) $\alpha_р = 15 \div 25°$. Недостатком ролика типа Е является сложность одновременного обеспечения размерной точности и необходимой шероховатости поверхности, поскольку большие подачи не обеспечивают качества поверхности, так как перед

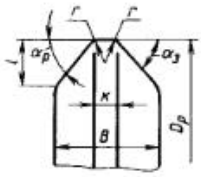
4. Геометрические параметры роликов для ротационной вытяжки конических деталей и деталей с криволинейной образующей (размеры, мм)

Тип ролика, эскиз	Тип детали	Толщина заготовки	Геометрические параметры роликов					
			$\alpha_р^\circ$	$\alpha_з^\circ$	l	R	r	$к$
Тип А. Ролик с односторонним конусом 	Конические	До 4	24—45	—	$h_ф + 5$	—	$(6 \div 8)\,H$	—
		Св. 4	24—45	—	$h_ф + 5$	—	$(4 \div 6)\,H$	—
Тип Б. Ролик с двойным конусом 	С выпукло-вогнутой поверхностью	До 4	25—45	25—45	$h_ф + 5$	—	$(6 \div 8)\,H$	—
		Св. 4	24—35	30—45	$h_ф + 5$	—	$(4 \div 6)\,H$	—

Продолжение табл. 4

Тип ролика, эскиз	Тип детали	Толщина заготовки	Геометрические параметры роликов					
			$\alpha_р^\circ$	$\alpha_з^\circ$	l	R	r	$к$
Тип В. Ролик радиусный выпуклый 	С вогнутой поверхностью	До 4	—	—	—	$(0{,}5 \div 0{,}8)\,D$	$(6 \div 8)\,H$	—
		Св. 4	—	—	—	$(0{,}5 \div 0{,}8)\,D$	$(4 \div 6)\,H$	—
Тип Г. Ролик радиусный вогнутый 	Конические и с криволинейной образующей, изготовляемые из цилиндрических заготовок	До 4	—	—	$\frac{D-d}{2}$	$(6 \div 8)\,h$	$(6 \div 8)\,H$	—
		Св. 4	—	—	$\frac{D-d}{2} + (1 \div 5)$	$(6 \div 8)\,h$	$(4 \div 6)\,H$	—

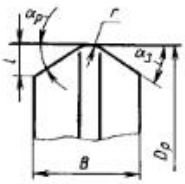
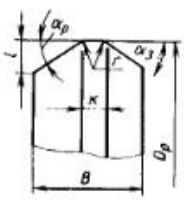
Продолжение табл. 4

Тип ролика, эскиз	Тип детали	Толщина заготовки	Геометрические параметры роликов					
			$\alpha_р^\circ$	$\alpha_з^\circ$	l	R	r	$к$
Тип Д. Ролик двусторонний с калибрующим пояском 	Выглаживание поверхности различных деталей	До 4	25—45	25—45	$h_ф + 5$	—	$(2 \div 5)\ H$	$(3 \div 5)\ S$
		Св. 4	25—35	30—45	$h_ф + 5$	—	$(2 \div 5)\ H$	$(3 \div 5)\ S$

Примечания: 1. Диаметр $D_р$ и ширину B ролика принимают для всех типов роликов в зависимости от условий эксплуатации и конструктивных особенностей используемого оборудования.

2. Длину l для роликов типов А, Б, Д принимают в зависимости от высоты фланца и угла установки роликов.

5. Геометрические параметры роликов для ротационной вытяжки цилиндрических деталей (размеры, мм)

Тип ролика, эскиз	Тип детали	Материал	Геометрические параметры роликов					
			$\alpha_р^\circ$	$\alpha_з^\circ$	$\alpha_в$	r	$к$	l
Тип Е. Ролик с двойным конусом 	Цилиндрические с постоянной и переменной толщиной стенки	Высокопрочные стали и сплавы	20—30	4—45	—	$(1{,}5 \div 3)\ \Delta h$	—	$\Delta h + (3 \div 5)$
		Низкоуглеродистые стали, медные и алюминиевые сплавы	15—20	5—45	—	$(1{,}5 \div 3)\ \Delta h$	—	$\Delta h + (3 \div 5)$
Тип Ж. Ролик с двойным конусом и калибрующим пояском 	То же	Высокопрочные стали и сплавы	20—30	5—35	—	1—3	$(3 \div 5)\ S$	$\Delta h + (3 \div 5)$
		Низкоуглеродистые стали, медные и алюминиевые сплавы	15—25	4—45	—	2—4	$(3 \div 5)\ S$	$\Delta h + (3 \div 5)$

Продолжение табл. 5

Тип ролика, эскиз	Тип детали	Материал	Геометрические параметры роликов					
			$\alpha_р^\circ$	$\alpha_з^\circ$	$\alpha_в$	r	κ	l
Тип З. Ролик с ограничительной поверхностью	Цилиндрические гладкие или двухступенчатые	Высокопрочные стали и сплавы Низкоуглеродистые стали, медные и алюминиевые сплавы	25—30 20—25	5—45 5—45	5—10 3—5	1—3 1—3	(3÷5) S (3÷5) S	(0,9÷1) Δh (0,85÷0,95) Δh
Тип И. Ролик радиусный	Цилиндрические гладкие	То же	—	—	—	(6÷8) Δh	—	—
Тип К. Ролик поддерживающий	Цилиндрические с постоянной и переменной толщиной стенки	То же	—	—	10—15	2—5	—	—

Примечания: 1. См. примечания к табл. 4.
2. Δh — утонение за один проход.

фронтом ролика образуется наплыв, величина которого пропорциональна углу $\alpha_р$ и подаче S. Уменьшение угла $\alpha_р$ и значений S приводит к изменению диаметра детали и потере точности. В отличие от ролика типа Е, ролик типа Ж имеет калибрующий поясок, величина которого $k = (3 \div 5)\ S$. Наличие в ролике такого пояска обеспечивает более низкую шероховатость поверхности. Радиус при вершине ролика $r = 1 \div 5$ мм.

Ролики типа З находят широкое применение при производстве гладких цилиндрических деталей и цилиндрических деталей с концевыми утолщениями толщиной H. Наличие у ролика вспомогательной поверхности, выполненной под углом $\alpha_в$, препятствует образованию наплыва, что позволяет интенсифицировать процесс вытяжки различных материалов с обеспечением высокой производительности. Угол вспомогательной поверхности принимают равным $\alpha_в = 3 \div 10°$. Меньшие значения $\alpha_в$ задают при обработке мягких легкодеформируемых материалов, а верхние — для высокопрочных материалов. Высоту гребня ролика l для мягких материалов принимают $l = \Delta h$, для легкодеформируемых материалов $l = (0{,}85 \div 0{,}95)\ \Delta h$. Ширина калибрующего пояска k и радиусов такая же, как у ролика типа Ж.

В рассмотренных выше типах роликов углы задней поверхности допускается принимать в широких пределах с учетом обеспечения профиля переходных участков с одной толщины стенки на другую.

Радиусный ролик типа И применяют, как правило, для ведения процесса на мощных специализированных станках по схеме обратной вытяжки. Ролики типа К являются вспомогательными и предназначены для исключения возможности образования наплыва. Эти ролики применяют для калиброванной схемы ротационной вытяжки (см. рис. 8), где они работают совместно с роликами типа Е и Ж. В процессе работы калибрующий поясок вспомогательного ролика перекрывает зону очага деформации, создаваемую рабочими роликами, препятствуя образованию наплыва.

Выбор технологических режимов. Технологические режимы процесса ротационной вытяжки устанавливают из расчета обеспечения качества получаемых деталей и высокой производительности.

Машинное время, затрачиваемое на процесс формоизменения детали за один проход,

$$T_0 = L/nS, \qquad (13)$$

где L — длина обработки, мм; n — частота вращения заготовки, мин$^{-1}$.

При многопроходном процессе $T_{ом} = \sum_1^N T_0$, где N — число проходов.

Из анализа зависимости (13) следует, что производительность процесса лимитируется длиной обработки, числом проходов, величиной продольной подачи и частотой вращения шпинделя станка. Таким образом, при реализации процесса ротационной вытяжки следует стремиться к работе с большими подачами, максимально допустимой частотой вращения заготовок и минимальным числом проходов.

На практике возможности повышения значений n и S ограничены схемой кинематики станка и его жесткостью, интенсивностью тепловыделения, мощностью привода вращения и т. д. (т. е. возможностями применяемого оборудования, а также необходимостью обеспечения заданных качественных характеристик обрабатываемой детали).

Предельная окружная скорость (м/мин) заготовки

$$v = W60/1020\eta/P_т, \qquad (14)$$

где W — мощность привода станка, кВт; η — КПД привода; $P_т$ — тангенциальная составляющая усилия, H.

Частота вращения заготовки

$$n = 1000v/\pi D. \qquad (15)$$

В целях ограничения теплового эффекта и исключения вибраций, возникающих при недостаточной жесткости системы СПИД, а также обеспечения размерной точности деталей рекомендуется процесс ротационной вытяжки вести при скоростях $v = (120 \div 300)$ м/мин.

6. Число проходов при ротационной вытяжке деталей различной формы и размеров при их изготовлении из плоских заготовок

L/D	Число проходов при вытяжке деталей		
	цилиндрических	конических	с криволинейной образующей
1	1	1	1
До 1,5	1—2	1	1
1,6—2,5	2—3	1—2	1—2
2,6—3,5	3—4	2—3	2—3
3,6—4,5	4—5	3—4	3—4
4,6—6,0	5—6	4	4

Наиболее важным фактором при ротацнонной вытяжке, влияющим на качество получаемой детали, является величина подачи деформирующего ролика за один оборот детали.

Подачи, используемые при ротационной вытяжке, находятся в широком диапазоне (0,2—5 мм). Поэтому в каждом конкретном случае подачу выбирают исходя из свойств обрабатываемого материала, диаметральных размеров, толщины стенкн и точностных характеристик изготовляемой детали.

Так, обработку деталей небольшого диаметра (до 150 мм) рекомендуется производить при подачах $S = (0{,}2 \div 1)$ мм. При ротационной вытяжке деталей среднего и большого диаметра рекомендуется пропорционально увеличить подачу до $S = (1{,}25 \div 5)$ мм. Для обработки деталей из мягких матерналов, а также тонкостенных деталей следует прнннмать меньшне значення подачи.

Прн ротацнонной вытяжке деталей с повышеннымн точностнымн характернстнкамн оптимальную подачу в указанных днапазонах устанавливают экспернментально.

Чнсло проходов, необходимое для получения детали, зависнт от толщнны стенкн заготовки, профиля н длнны детали, а также свойств обрабатываемого матернала. Прн ротацнонной вытяжке деталей для определения числа проходов можно использовать выражение

$$N = \frac{\Delta h}{\Delta h_{i\ ср}}, \qquad (16)$$

где $\Delta h_{i\ ср}$ — среднее утонение за один проход. В табл. 6 приведено число проходов для изготовления деталей в зависимости от их формы и размеров.

В процессе ротационной вытяжки происходит упрочнение металла и снижаются его пластические свойства.

Степень упрочнения при ротационной вытяжке зависит от свойств обрабатываемого материала (способности его к упрочнению), степени деформации и условий деформирования.

Как правило, при изготовлении деталей ротационной вытяжкой величину суммарной деформации назначают на 10—20 % ниже предельно допустимой степени деформации для данного материала. При необходимости дальнейшего деформирования полуфабрикатов требуется восстановление пластических свойств металла, что достигается отжигом (высоким или низким). Для низкоуглеродистых сталей отжиг может быть замеиен нормализацией при температуре 920—950 °С.

Для отдельных деталей явление упрочнения используется как положительный фактор для повышения их конструктивной прочности и эксплуатационных качеств.

На рис. 10 приведены графики зависимости механнческих свойств ($\sigma_в$, $\sigma_т$, δ) от степени деформацин при ротационной вытяжке.

На овальность и прямолинейность, равно как н на разностенность, готовой детали оказывает влнянне исходная разностенность заготовкн н неравномерность механических свойств в ее различных продольных сеченнях. Для получения деталей высокого качества по указанным параметрам необходнмо нспользовать заготовки, полученные механнческой обработкой с последующей термической обработкой. Прн многопроходной вытяжке термнческую обработку целесообразно проводнть перед окончательным проходом. При невозможностн обеспечення высоких требований по разностенности в исходной заготовке процесс вытяжки целесообразно разделить на несколько проходов, поскольку при большем числе проходов уменьшается разностенность и улучшаются качественные характеристикн овальностн н прямолинейности.

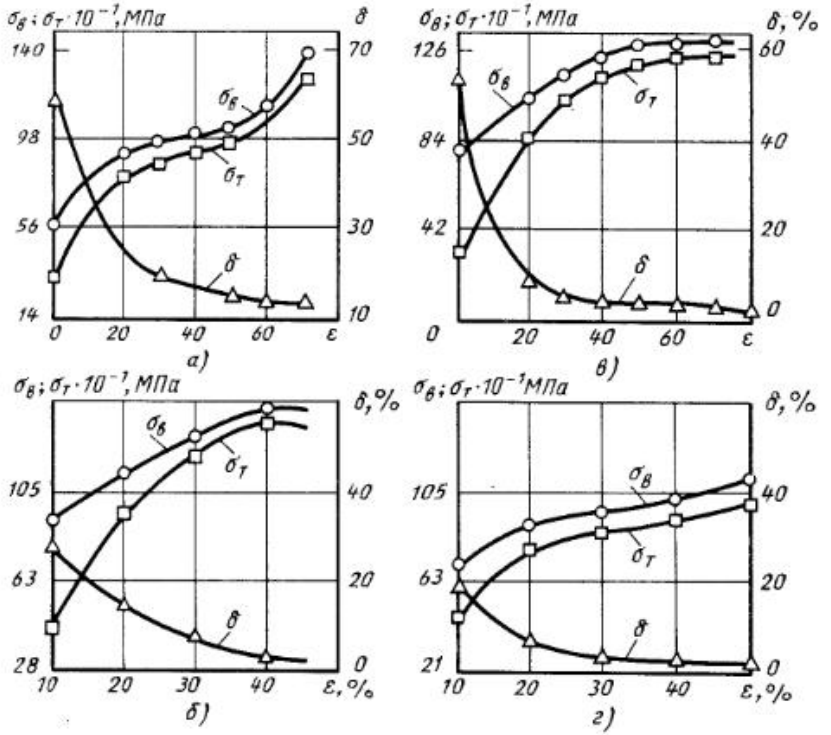


Рис. 10. Механические характеристики металлов и сплавов при ротационной вытяжке
а — аустенитная коррозионно-стойкая сталь (17—19 % Cr, 8—10 % Ni); *б* — коррозионно-стойкая сталь (15 % Cr, 7 % Ni); *в* — жаропрочный сплав (15 % Cr, 73 % Ni); *г* — высокопрочная сталь (0,8 % Cr, 38 % Ni, 0,25 % Mo)

В табл. 7 прнведены основные виды дефектов, встречающиеся прн ротационной вытяжке деталей, указаны способы их устранения.

Силовые параметры процесса. Для осуществления процесса ротацнонной вытяжкн нспользуемое оборудование должно развнвать усилне, достаточное для преодоления сопротнвления обрабатываемого матернала пластнческому деформнрованню. Определить действительную величину и направление результирующего усилия при ротационной вытяжке затруднительно, поэтому на практике определение силовых параметров процесса ротацнонной вытяжки сводят к определению трех составляющих результирующего усилия: раднальной P_R, осевой P_O и тангенцнальной P_T, с помощью которых производят выбор оборудования.

Тангенциальная составляющая P_T определяет потребную мощность прнвода вращення н крутящий момент на шпинделе станка. По осевой составляющей P_O определяют необходнмое усилне, развиваемое механнзмом продольной подачи, а раднальная составляющая P_R должна учнтываться прн

7. Дефекты, возникающие в процессе ротационной вытяжки, и способы их устранения

Вид дефекта	Применяемая схема обработки	Причина возникновения дефекта	Способы устранения дефектов
Образование наплыва металла перед зоной деформации при открытой калибровке	Рис. 5	1. Неправильно выбран профиль инструмента 2. Неправильно назначен режим подачи	1. Уменьшить рабочий угол α_p ролика 2. Уменьшить подачу 3. Развернуть ролики на угол подачи
То же, при закрытой калибровке	Рис. 6 и 7	Неправильно выбран профиль инструмента	1. Уменьшить высоту l гребня ролика 2. Уменьшить угол $\alpha_в$
Увеличенный диаметр детали, изготовленной раскаткой	Рис. 5—9	1. Неправильно назначен режим подачи 2. Неправильно выбран профиль роликов	1. Увеличить подачу 2. Увеличить угол α_p
Неудовлетворительное качество поверхности (закаты, шелушение)	Рис. 1—9	1. Неудовлетворительное состояние роликов (забоины, отклонение от круглости и т. д.) 2. Образование наплыва металла перед зоной деформации 3. Грубая обработка исходных заготовок	1. Произвести восстановление инструмента 2. Уменьшить подачу и рабочий угол ролика 3. Произвести доработку исходных заготовок
Затруднен съем детали с оправки	Рис. 5—9	1. Уменьшение внутреннего диаметра изготовляемой детали 2. Неудовлетворительное состояние поверхности оправки (забоины, задиры, раковины)	1. Уменьшить угол α_p роликов 2. Увеличить радиус при вершине ролика 3. Увеличить величину k калибрующего пояска 4. Уменьшить подачу
Неудовлетворительное качество внутренней поверхности	—	1. На внутренней поверхности оправки задиры, забоины и т. д. 2. Неудовлетворительное качество внутренней поверхности заготовок	1. Заменить оправку 2. Произвести доработку исходных заготовок

8. Расчетные коэффициенты при ротационной вытяжке деталей без утонения стенки

Материал заготовки	c	β	k_S	k_r при r_p/H					
				3	6	9	12	15	18
Сталь для глубокой вытяжки	0,024	0,74	33	1,75	1,28	1	1,1	1,14	1,2
Алюминий (АД1М)	0,033	0,79	21	1,85	1,35	1	1,12	1,18	1,22

определении потребного усилия механизма радиального перемещения роликов.

Величина составляющих усилия зависит от нескольких факторов, основными из которых являются механические свойства (предел текучести $\sigma_т$) обрабатываемого материала, диаметральные размеры детали и деформирующих роликов, деформация (абсолютная и относительная), подача S за один оборот шпинделя, а также геометрические параметры рабочего профиля деформирующих роликов.

Так, с увеличением предела текучести обрабатываемого материала пропорционально возрастают все три составляющие усилия. Увеличение диаметральных размеров роликов и детали также приводит к увеличению потребных усилий P_R и P_O при незначительном изменении P_T.

С увеличением абсолютной деформации и подачи S составляющие усилия возрастают.

Увеличение угла наклона рабочей поверхности конических роликов приводит к возрастанию осевого усилия P_O и снижению радиального P_R. При применении радиусных роликов с увеличением их радиуса осевое усилие уменьшается, а радиальное — возрастает. В то же время изменение рабочего угла и радиуса роликов не оказывает существенного влияния на величину тангенциального усилия.

Расчет составляющих результирующего усилия может быть выполнен с помощью следующих формул.

При ротационной вытяжке деталей конической и криволинейных форм:

без утонения стенки

$$P_T = (0{,}2 \div 0{,}3)\, P_O; \quad (17)$$

$$P_R = (0{,}8 \div 0{,}9)\, P_O; \quad (18)$$

$$P_O = c\sigma_в H h^\beta S k_r k_S; \quad (19)$$

с утонением стенки по закону синуса

$$P_T = (0{,}12 \div 0{,}2)\, P_O; \quad (20)$$

$$P_R = 6{,}8\sigma_в H \cos\alpha; \quad (21)$$

$$P_O = 6{,}8\sigma_в H \cos\alpha. \quad (22)$$

При ротационной вытяжке цилиндрических деталей с утонением стенки

$$P_T = K_T \sigma'_m H S \text{ или } P_T = \sigma_m \Delta h S / k_f; \quad (23)$$

$$P_R = k_R \sigma'_m H \sqrt{D_p S \operatorname{ctg}\alpha_p}$$

или $$P_R = \sigma_m \Delta h \sqrt{D_p \operatorname{ctg}\alpha_p}/k_f; \quad (24)$$

$$P_O = k_0 \sigma'_m H \sqrt{D_p S \operatorname{tg}\alpha_p} \text{ или}$$

$$P_O = \sigma_m \Delta h \sqrt{D_p \operatorname{tg}\alpha_p}/k_f. \quad (25)$$

В формулах (17)—(25) приняты следующие обозначения: $\sigma_в$ — временное сопротивление разрыву, МПа; $\sigma_т$ — предел текучести при растяжении, МПа; α — угол наклона образующей поверхности детали к оси вращений,

град; c — коэффициент пропорциональности; β — показатель степени, характеризующий влияние высоты фланца на усилие P_O; k_r — коэффициент, характеризующий влияние r_p/H; k_S — коэффициент, характеризующий влияние подачи S; σ_m' — среднее сопротивление материала, МПа; $\sigma_m' = 2\sigma_m\sqrt{3}$; k_f — КПД процесса ($k_f = 1{,}0 \div 0{,}35$); k_T; k_R; $k_O = 0{,}1 \div 0{,}38$ при прямом способе ротационной вытяжки и k_T; k_R; $k_O = 0{,}1 \div 0{,}9$ при обратном способе.

Значения коэффициентов c, β, k_r и k_S приведены в табл. 8.

Результирующее усилие ротационной вытяжки

$$P_{\text{расч}} = \sqrt{P_T^2 + P_R^2 + P_O^2}. \quad (26)$$

Оборудование для ротационной вытяжки. По исполнению станки для ротационной вытяжки в зависимости от расположения оси шпинделя разделяют на вертикальные и горизонтальные, которые по своим габаритам могут быть легкими, средними и тяжелыми. По числу устанавливаемых на станках деформирующих роликов различают станки одно- и многороликовые, которые по степени механизации разделяют на станки с ручным приводом инструмента, с механическим приводом, а также станки с полуавтоматическим и автоматическим управлением.

В табл. 9—13 приведены технические характеристики отдельных станков для ротационной вытяжки.

9. Станки для ротационной вытяжки (СССР)

Технические данные	Модель станка							
	1К62с (ГСП-41)	КЖ-9706	СДГ-20	СРГ-12-1800	СРГ-0,6-1000	СРГ-1	ТГ-76М	СХПТ-2000
Диапазон диаметров обрабатываемых деталей, мм	До 200	60—900	200—1200	200—1200	100—600	400—1000	500—1200	1000—2000
Максимальная длина детали, мм	700	600	1000	1800	1000	3000	1000	2400
Максимальная толщина обрабатываемой заготовки, мм	2	3	10	10	10	12	6	10
Число деформирующих роликов	1	1	3	3	3	3	2	2
Диапазон частоты вращения шпинделя, мин$^{-1}$	12—2000	10—1250	32—692	36—367	38—414	11—460	50—250	30—150
Мощность привода вращения шпинделя, кВт	10	18,5	20	20	14	220	55	125

10. Станки фирмы «Ляйфельд» (ФРГ) для ротационной вытяжки деталей конической и криволинейной формы

Технические данные	Модель станка					
	ПНЦ-350	ПНЦ-450	ПНЦ-600	ПНЦ-900	ПНЦ-1200	ПНЦ-1800
Максимальный диаметр обрабатываемых заготовок, мм	690	890	1190	2390	2390	4400
Длина хода суппорта, мм:						
продольная	400	800	1200	2200	1220	2200
поперечная	250	310	500	700	500	700
Усилие суппорта, кН:						
продольное	20	65	100	300	100	300
поперечное	22	65	100	400	100	400
Мощность привода, кВт	5,5	18,5	30	87	45	90

11. Станки фирмы «Ляйфельд» (ФРГ) для ротационной вытяжки цилиндрических деталей

Технические данные	Модель станка		
	ST40-22CNC	ST56-75CNC	ST65-132CNC
Диаметр обрабатываемых заготовок (мин/макс), мм	30/400	60/560	100/650
Длина хода суппорта, мм	1300	2100	2 400
Осевое усилие суппорта, кН	150	300	400
Радиальное усилие на ролик, кН	100	200	400
Мощность двигателя главного привода, кВт	22	75	132
Диапазон частоты вращения шпинделя, мин$^{-1}$ (регулирование бесступенчатое)	26—820	36—820	220—820
Масса станка в сборе, кг	15 000	34 000	62 000

12. Станки фирмы «Рондолотти» (Франция) для ротационной вытяжки деталей

Технические данные	Модель станка					
	AUT0600	GM880	GM1301	2600 LC исполнений		
				I	II	III
Высота центров, мм	350	440	690	130	130	130
Межцентровое расстояние, мм	900	1100	1620	2 000	2 000	2 000
Диапазон частоты вращения шпинделя, мин$^{-1}$ (регулирование бесступенчатое)	225—2700	11—1300	11—1300	0,6—326	0,6—326	0,6—315
Мощность привода вращения, кВт	6	5,5	7,5	60	70	115
Длина хода суппорта, мм:						
продольного	350	550	550	1 200	1 600	1 900
поперечного	260	250	250	450	450	450
Усилие подачи, кН:						
продольной	18	52	52	230	230	270
поперечной	18	27	27	250	250	300
Масса станка в сборе, кг	3200	5600	5750	36 000	37 000	39 000

13. Станки фирмы «Тосиба» (Япония) для ротационной вытяжки полых осесимметричных деталей

Технические данные	Модель станка			
	HSD 240-1700	HSD 300-2000	HSD 360-300	HSD 400-500
Максимальный диаметр обрабатываемой заготовки, мм	240	300	360	400
Максимальная толщина стенки обрабатываемой заготовки, мм	15	20	4,5	15
Длина хода суппорта, мм	1700	2000	300	500
Максимальное усилие на ролик, кН	90	160	15	100
Максимальное усилие съема, кН	50	50	—	—
Мощность привода, кВт	37	55	11	45
Диапазон частоты вращения шпинделя, мин$^{-1}$ (регулирование бесступенчатое)	20—200	30—300	50—500	50—500

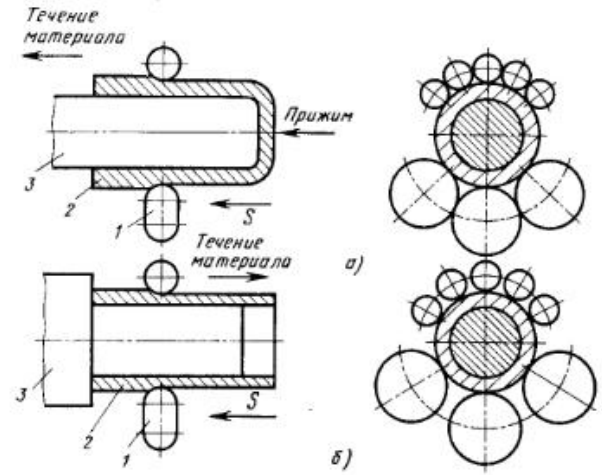


Рис. 11. Способы ротационной вытяжки:
а — прямой; *б* — обратный; *1* — деформирующий элемент; *2* — деталь; *3* — оправка

2. РОТАЦИОННАЯ ВЫТЯЖКА ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Одним из методов ротационной вытяжки является формообразование заготовки, находящейся на оправке, с помощью специального устройства, в котором основным формоизменяющим инструментом являются шарики, выпускаемые шарикоподшипниковой промышленностью, или специальные профилированные ролики (рис. 11). Процесс осуществляется на универсальном токарно-винторезном оборудовании, продольный суппорт или задняя бабка которого используются для установки устройства, а шпиндель станка — для закрепления на нем оправки.

Ротационная вытяжка роликовыми и шариковыми устройствами обеспечивает лучшую размерную точность и качество поверхности получаемых деталей по сравнению с ротационной вытяжкой на специальном оборудовании одним — тремя роликами большого диаметра.

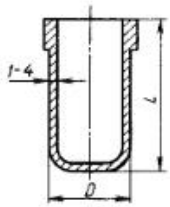
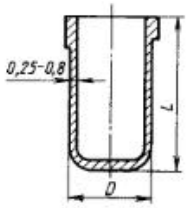
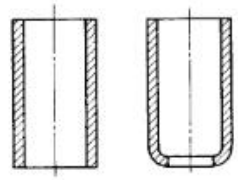
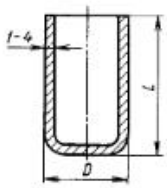
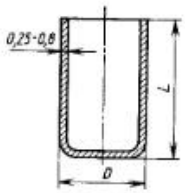
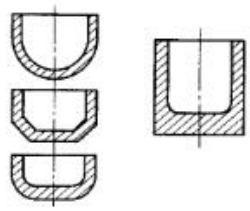
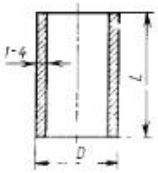
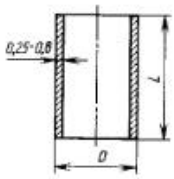
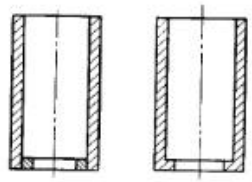
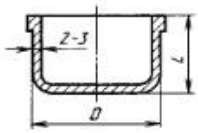
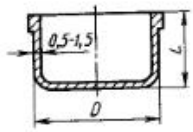
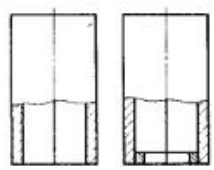
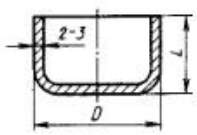
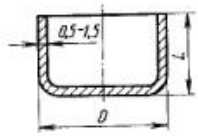
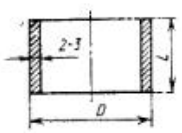
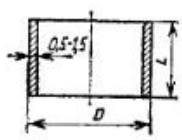
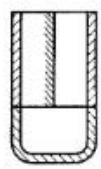
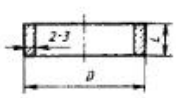
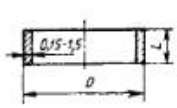
Преимущества этого процесса характеризуется бо́льшим по сравнению с механической обработкой коэффициентом использования металла и низкой стоимостью по сравнению с обычной вытяжкой оборудования и оснастки.

Процесс является эффективным даже в условиях серийного и мелкосерийного производства при получении высокоточных тонкостенных осесимметричных цилиндрических деталей из обычных и труднодеформируемых материалов и сплавов.

Классификация тонкостенных цилиндрических оболочек. Номенклатуру выпускаемых различными отраслями машиностроения тонкостенных деталей можно разбить по форме и соотношению размеров H, D и L на четыре основные группы (табл. 14). Как правило, оболочки изготовляют механической обработкой и обработкой давлением — вытяжкой, а толщину их стенок H заведомо выполняют большей, чем это требуется условиями эксплуатации. Последнее связано с ограниченными возможностями получения тонкостенных оболочек указанными методами.

Ротационная вытяжка с помощью специальных устройств позволяет изготовлять изделия с более тонкими стенками из толсто- и тонкостенных

14. Классификация оболочек

Цилиндрические оболочки	Форма оболочки: применяемая	Форма оболочки: рекомендуемая	Способ получения: применяемый	Способ получения: рекомендуемый	Рекомендуемая форма заготовки
I группа ($L/D = 0{,}5 \div 1{,}0$; $H/D = 0{,}005 \div 0{,}02$)					
Одно- и многоступенчатые с закрытой концевой частью			Механическая обработка		
Гладкие с закрытой концевой частью			Обработка давлением	Ротационная вытяжка шариковыми и роликовыми устройствами	
Гладкие с открытой концевой частью					
II группа ($L/D = 0{,}25 \div 1{,}80$; $H/D = 0{,}002 \div 0{,}010$)					
Одно- и многоступенчатые с закрытой концевой частью			Механическая обработка	Ротационная вытяжка шариковыми и роликовыми устройствами	
Гладкие с закрытой концевой частью			Обработка давлением		
Гладкие с открытой концевой частью			Обработка давлением и механическая обработка	Ротационная вытяжка шариковыми и роликовыми устройствами	
III группа ($L/D = 0{,}02$—$0{,}50$; $H/D = 0{,}001 \div 0{,}05$)					
Оболочки гладкие в виде колец			Механическая обработка	Ротационная вытяжка шариковыми и роликовыми устройствами	

Продолжение табл. 14

Цилиндрические оболочки	Форма оболочки	Способ получения		Рекомендуемая форма заготовки
		применяемый	рекомендуемый	
Оболочки одно- и многоступенчатые, гладкие с закрытой профильной концевой частью	применяемая	Механическая обработка, обработка давлением	Ротационная вытяжка шариковыми и роликовыми устройствами	
	рекомендуемая			

IV группа ($L/D = 0,25—2,50$; $H/D = 0,002 \div 0,010$)

заготовок с максимальным использованием материала.

Вид заготовки определяется размерами оболочки, ее назначением, заданной точностью и способом вытяжки. Для группы I оболочек рациональной заготовкой является труба, полученная волочением или прессованием. Такая заготовка может быть использована при прямом и обратном способе ротационной вытяжки. В случае прямого способа один из открытых концов заготовки завальцовывается или в него вваривается упорное кольцо. Для этого способа могут быть также использованы трубные заготовки с внутренним уступом, полученным механической обработкой внутреннего диаметра трубы или выдавливанием. Заготовки в виде труб могут быть использованы для получения оболочек-колец (см. табл. 14, группа III). Изготовленная ротационной вытяжкой оболочка большой длины разрезается на кольца заданной ширины.

Для оболочек групп I и IV рационально использовать в качестве заготовок колпаки, полученные обычной вытяжкой или выдавливанием. Эффективно использование для оболочек группы II заготовок, полученных из плоского листа вальцовкой, с последующей сваркой стыка. Такие обечайки могут быть сварены с предварительно полученными колпаками. Использование сварных и штампосварных заготовок позволяет исключить операцию зачистки сварного соединения, сократить число операций и снизить расход материала и себестоимость изготовления оболочки.

Выбор и расчет заготовок. Выбор толщины стенки заготовки связан с пластичностью материала, которая оценивается величиной предельного обжатия стенки оболочки в холодном состоянии без промежуточной термической обработки. Практикой установлено, что предельное обжатие для большинства материалов, подвергающихся ротационной вытяжке, находится в пределах 50—75 % (табл. 15).

Расчет заготовок для получения цилиндрических оболочек основан на равенстве объемов готовой детали и заготовки. Ниже приведены формулы

15. Значения предельной степени обжатия $\psi_{пр}$ стенок без промежуточной термической обработки

Материал	$\psi_{пр}$, %	Материал	$\psi_{пр}$, %
Сталь:		Молибден	60
высокопрочная	75	Вольфрам	60
жаропрочная	75	Алюминиевые сплавы	60—75
коррозионно-стойкая	60—70		

Примечание. При сварных заготовках значение $\psi_{пр}$ уменьшают в 2 раза (предусматривается только один проход).

для расчета размеров (мм) заготовки по размерам готовой детали.

Толщина стенки

$$H = \frac{-d_в(\psi-1) - \sqrt{(\psi-1)^2 d_в^2 - 4h(\psi-1)(d_в+h)}}{2(\psi-1)}.$$

Наружный диаметр $D_з = d_в + 2H$.

Длина заготовки $L_з = V_з/F_з$.

Объем заготовки $V_з = V_д + V_{отр} + V_{зав}$. Здесь $d_в$ — внутренний диаметр детали; $V_д$ — объем детали; $V_{отр}$ — объем материала на отрезку (10—15 % от $V_д$); $V_{зав}$ — объем материала на завальцовку (10—20 % от $V_д$); $F_з$ — площадь заготовки.

В производственных условиях основные размеры заготовки можно определять с помощью номограмм (рис. 12).

Конструкции устройств для ротационной вытяжки. Для получения тонкостенных цилиндрических деталей используют устройства, которые устанавливают на токарные станки различных типов. В табл. 16 приведены конструкции шариковых и роликовых устройств.

В качестве деформирующих элементов в шариковых устройствах применяют шарики различных диаметров. Размер и число шариков оказывают существенное влияние на условия обработки и качество поверхности оболочек. Большие размеры шариков целесообразно применять при относительно толстых стенках заготовки и при формоизменении с большими степенями обжатия. Шарики диаметром 10—20 мм успешно используют при обработке заготовок с тонкими стенками (0,8—1,5 мм). Для заготовок с меньшей толщиной стенки следует выбирать шарики диаметром менее 10 мм. Такие же размеры давильных элементов могут быть применены для калибровочных проходов с целью достижения размерной точности и шероховатости поверхности. Оптимальный диаметр шариков может быть выбран в зависимости от толщины стенки

$$d_ш = (5 \div 10)\, H \qquad (27)$$

или с помощью номограммы (рис. 13).

Выбор размера шарика хорошо регламентирует отношение

$$0{,}1 < H/d_ш < 0{,}2. \qquad (28)$$

При соотношении $H/d_ш < 0{,}1$ имеет место увеличение зазора между оправкой и стенкой заготовки. При $H/d_ш > 0{,}2$ резко возрастает наплыв материала перед фронтом давильных элементов, что нарушает ход процесса.

Число давильных элементов, необходимое для ведения процесса,

$$m_{шт} = \pi(m+1) - 1, \qquad (29)$$

где

$$m = D/d_ш. \qquad (30)$$

Наряду с шариковыми устройствами для ротационной вытяжки находят

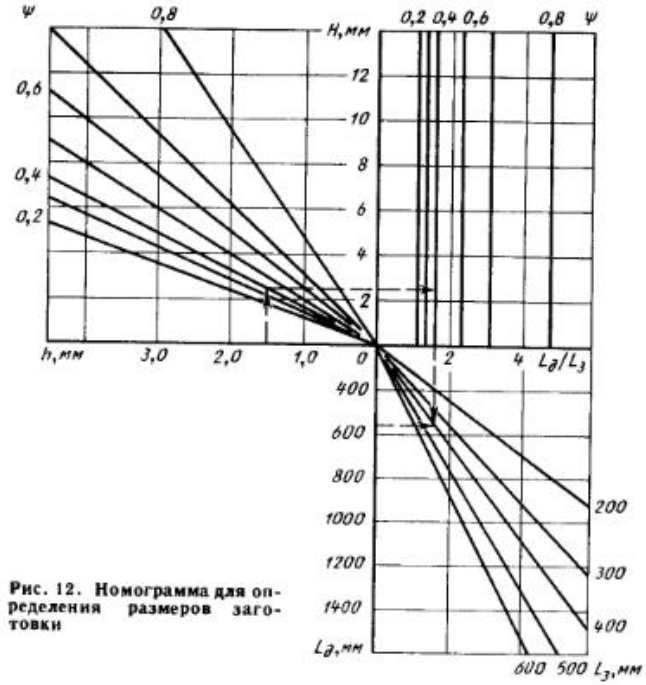


Рис. 12. Номограмма для определения размеров заготовки

применение и ролнковые устройства, которые позволяют осуществлять значительные обжатия за один проход и тем самым сокращать число проходов, сохраняя при этом необходимое качество получаемых оболочек.

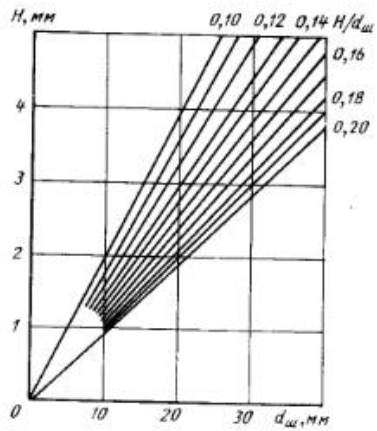
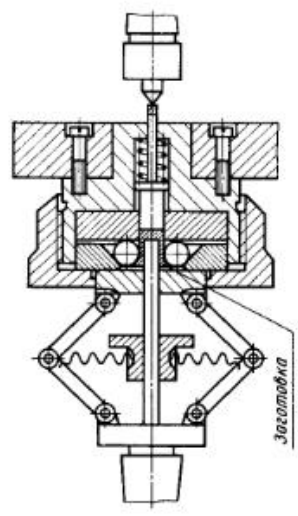
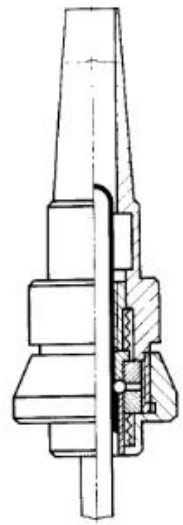


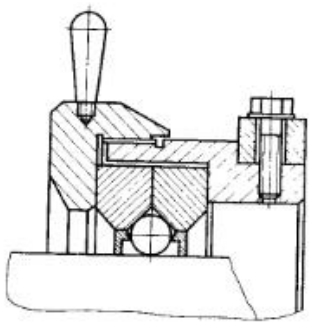
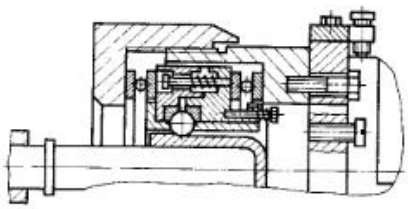
Рис. 13. Номограмма для определения размеров шарика

Деформирующие элементы в роликовых устройствах выполнены в виде профилированных роликов, имеющих специальные участки для контакта с опорными кольцами и с материалом. Наиболее простой с технологической точки зрения является рабочий участок, выполненный в виде тора, причем чем меньше радиус тора, тем выше точность получаемых оболочек, а чем больше, тем ниже шероховатость поверхности и выше качество наружной поверхности. На рис. 14 показаны различные конструкции роликов. Ролики (рис. 14, *а*) имеют сферический рабочий профиль и представляют собой типовую конструкцию с рабочим профилем *I*, опорными дорожками *II* для контакта с опорными кольцами и посадочные места *III* для осей. Такие ролики позволяют получить значительное обжатие за один проход с достаточно хорошей наружной поверхностью, просты в изготовлении.

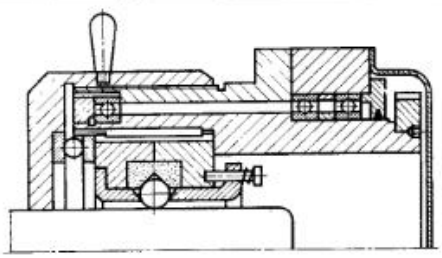
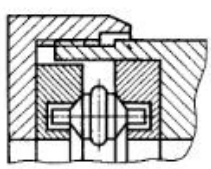
16. Конструкции шариковых и роликовых устройств и их назначение

Вид устройства и место установки на станке	Схема шарикового устройства	Вид заготовки	Назначение
Однорядные (шариковые)			
С жестко закрепленными кольцами и подвижным сепаратором. Установка на суппорте станка		Кружок	Для получения тонкостенных оболочек диаметром 5—10 мм за один проход
С жестко закрепленными кольцами и составным сепаратором. Установка на суппорте станка, в специальной жавке или в задней бабке с помощью конуса		Тонкостенные колпаки и трубы	Для получения тонкостенных оболочек диаметром 10—15 мм за один проход

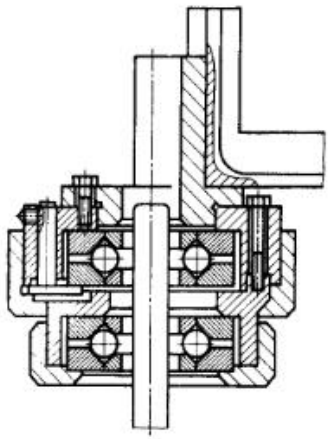
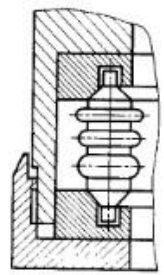
Продолжение табл. 16

Вид устройства и место установки на станке	Схема шарикового устройства	Вид заготовки	Назначение
С жестко закрепленными кольцами и целым сепаратором. Установка на суппорте станка		Тонкостенные колпаки и трубы	Для получения тонкостенных оболочек диаметром от 15 до 50 мм за несколько проходов
Со свободно вращающимися кольцами и составным сепаратором. Установка на суппорте станка		Тонкостенные и толстостенные колпаки и трубы	Для получения тонкостенных оболочек диаметром 50—200 мм за один или несколько проходов. Получение ступенчатых оболочек

Продолжение табл. 16

Вид устройства и место установки на станке	Схема шарикового устройства	Вид заготовки	Назначение
С принудительно вращающимися кольцами и составным сепаратором. Установка на суппорте станка		Тонкостенные и толстостенные колпаки и трубы	Для получения тонкостенных оболочек диаметром 50—200 мм за один или несколько проходов. Получение ступенчатых оболочек. Повышение производительности и качества поверхности
	Однорядные (роликовые)		
С жестко закрепленными кольцами и целым сепаратором. Установка на суппорте станка		То же	Для получения тонкостенных оболочек диаметром до 200 мм за один или несколько проходов
С размещением цапф роликов в кольцевых пазах опорных колец. Установка на суппорте станка		»	То же

Продолжение табл. 16

Вид устройства и место установки на станке	Схема шарикового устройства	Вид заготовки	Назначение
С жестко закрепленными кольцами и целым сепаратором. Установка в резцедержателе станка	*Многорядные (шариковые)* 	Короткие тонкостенные и толстостенные колпаки и трубы	Для получения тонкостенных оболочек диаметром 10—50 мм за один или несколько проходов. Получение ступенчатых оболочек
С жестко закрепленными кольцами с размещением цапф роликов в кольцевых пазах. Установка на суппорте станка	*Многорядные (роликовые)* 	Короткие толстостенные и тонкостенные колпаки и трубы	Для получения тонкостенных оболочек диаметром до 200 мм за один или несколько проходов

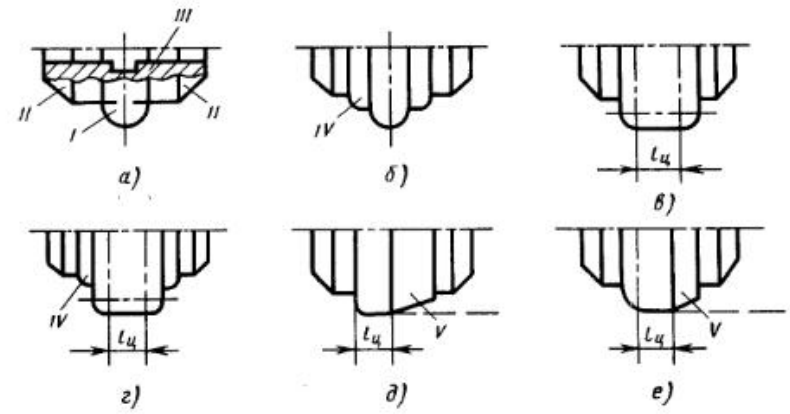


Рис. 14. Типовые конструкции роликов

Для обработки мягких материалов применяют ролики, имеющие специальный выступ *IV* — «крышу» (рис. 14, *б*, *г*), так как в процессе вытяжки с большими деформациями впереди фронта роликов образуется наплыв, а применение «крыши» снижает высоту наплыва.

Ролики, показанные на рис. 14, *в*—*е*, обеспечивают получение качественной поверхности, однако наличие площадки $l_ц$ приводит к увеличению овальности получаемых деталей.

Для уменьшения овальности и радиальной составляющей усилия применяют ролики с конической частью *V* (рис. 14, *д*, *е*).

Протяженность цилиндрического участка $l_ц$ оказывает большое влияние на точность геометрических размеров и качество наружной поверхности. Поэтому к выбору размера $l_ц$ в каждом конкретном случае обработки следует подходить с учетом реологических свойств обрабатываемого материала.

В качестве материала для роликов используют инструментальные стали (например, ШХ15, У10А и т. п.) с закалкой до твердости *HRC* 58—62. Таким образом, как сказано выше, ролики в отличие от шариков имеют два основных размера — наибольший диаметр d и радиус рабочей поверхности при вершине ролика $r_р$ (рис. 15), определяемый по формуле

$$r_р = (2{,}5 \div 3{,}5)\,H, \qquad (31)$$

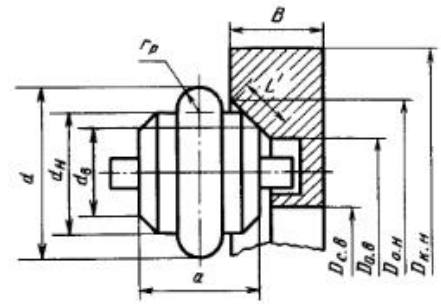


Рис. 15. Схема для определения размеров ролика ($d_н = d_{о.н}$)

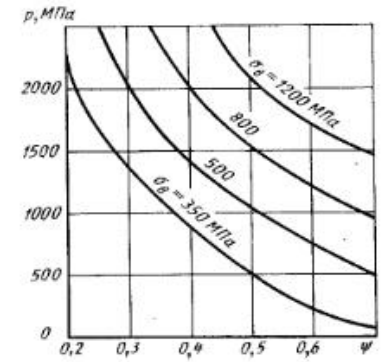


Рис. 16. Номограмма для определения давления

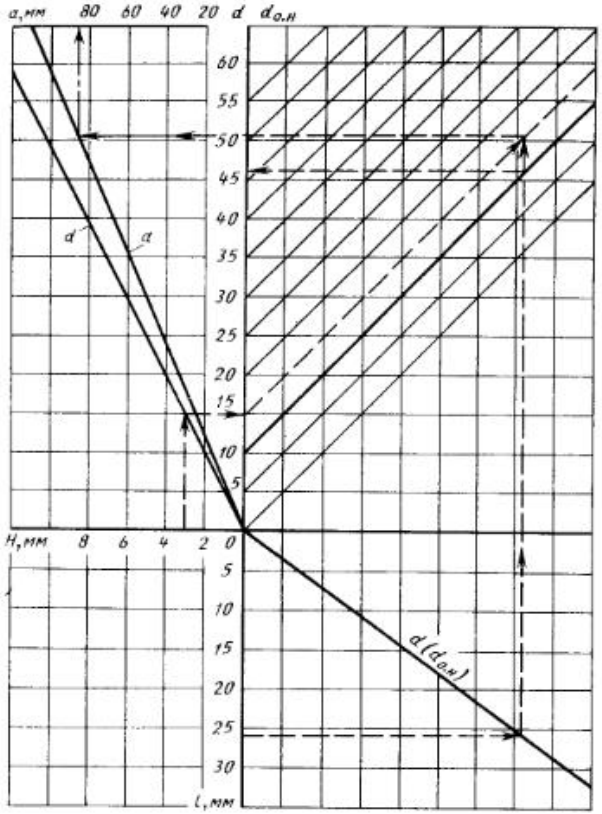


Рис. 17. Номограмма для определения размеров ролика

где по верхнему пределу определяют раднус ролнка, а по нижнему — минимально возможную толщину стенкн обрабатываемой заготовкн.

Диаметр ролнка

$$d = 1{,}4\,\frac{p\sqrt{2r_p\Delta h}}{[\sigma_{см}]} + 5H, \quad (32)$$

где p — давленне, возникающее между ролником и опорным кольцом (рис. 16); $[\sigma_{см}]$ — допустимое напряжение смятия материала ролика; $\sigma_{см} = (0{,}6 \div 0{,}8)\,\sigma_в$; Δh — утоиеиие стеики за проход.

Ширина ролика

$$a = 0{,}577d. \quad (33)$$

Чнсло ролнков определяют по формуле (29).

Нанбольшнй днаметр опорного пояска ролика

$$d_{о.н} = 1{,}4\,\frac{p\sqrt{2r_p\Delta h}}{[\sigma_{см}]} + 10. \quad (34)$$

Наименьшнй диаметр опорного пояска ролика прииимают $d_в = 10$ мм; угол наклона опорных поясков 90°. На рис. 17 представлена номограмма для определения размеров ролика.

В процессе обработки деформирующие элементы (шарики или ролики) контактируют с опориыми кольцами, конструкции которых приведены в табл. 17.

17. Конструкции опорных колец

Тип кольца	Схема конструкции	Диаметр шарика, мм	Тип кольца	Схема конструкции
Входное (схема *а*) и выходное (схема *б*) опорные кольца с двусторонней дорожкой и взаимной фиксацией	*Для шарикового устройства*	До 10	С односторонней дорожкой и кольцевым пазом для размещения цапф ролика	*Для роликового устройства*
		10—30	С односторонней дорожкой и радиальными пазами для размещения цапф роликов	
С двусторонней дорожкой		Св. 30	С двусторонней дорожкой	

Примечания: 1. Для изготовления опорных колец используются инструментальные стали У10.
2. Кольца подвергаются термической обработке до твердости *HRC* 61—63.
3. Шероховатость контактирующих поверхностей $Ra = 0{,}1$ мкм.

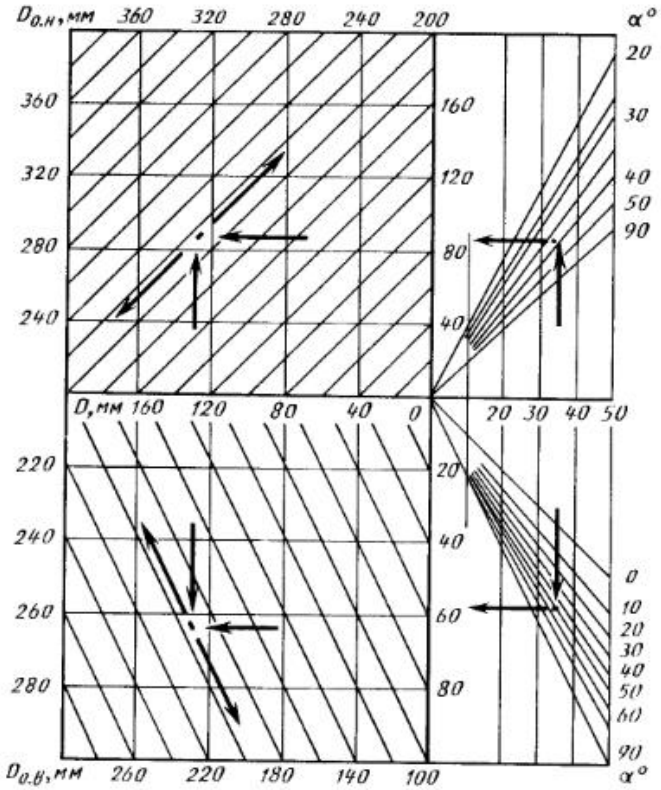


Рис. 18. Номограмма для определения размеров опорных колец для шариковых устройств

Основные размеры опорных колец определяют с помощью номограмм (рис. 18—20) или по следующим формулам.

Ширина опорной поверхности рабочей дорожки:

для шариковых устройств

$$L_c = 1/2\,(d_ш \operatorname{ctg} \alpha);$$

для роликовых устройств

$$L' = \frac{1{,}4 r_р\,[\sigma_{см}] + p\,\sqrt{(2 r_р \Delta h)}}{2 \cos \alpha\,[\sigma_{см}]}.$$

Наружный диаметр опорной поверхности рабочей дорожки:

для шариковых устройств

$$D_{о.н} = d_ш\,(m + 1 + 1/\sin \alpha);$$

для роликовых устройств

$$D'_{о.н} = D + 2\left[\frac{1{,}4p\,\sqrt{2r\Delta h' + 10}}{[\sigma_{см}]} + r_р\right].$$

Внутренний диаметр опорной поверхности рабочей дорожки:

для шариковых устройств

$$D_{о.в} = d_ш\,(m + 1 + \sin \alpha);$$

для роликовых устройств

$$D'_{о.в} = D + d + 10.$$

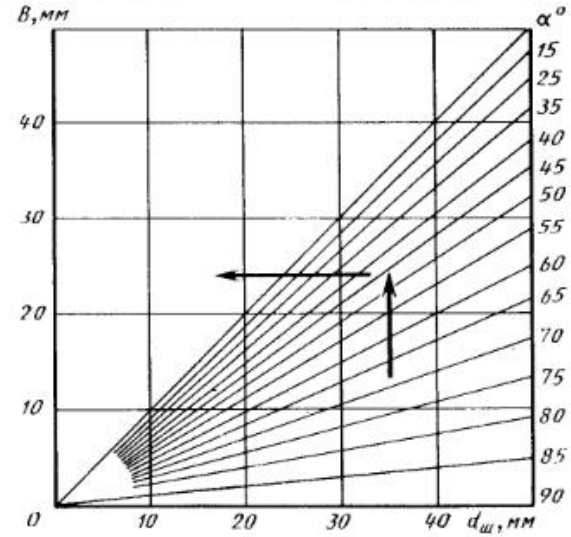


Рис. 19. Номограмма для определения ширины опорного кольца шариковых устройств

Ширина кольца:

для шариковых устройств

$$B = d_ш \cos \alpha;$$

для роликовых устройств

$$B = 2L \sin \alpha.$$

Наружный диаметр колец $D_{н.к} = D_{о.н} + 2B$; угол наклона опорной поверхности рабочей дорожки $\alpha = 45°$.

Свободное вращение рабочих элементов (роликов или шариков) и их удержание в рабочей зоне устройства обеспечивается с помощью сепараторов (табл. 18).

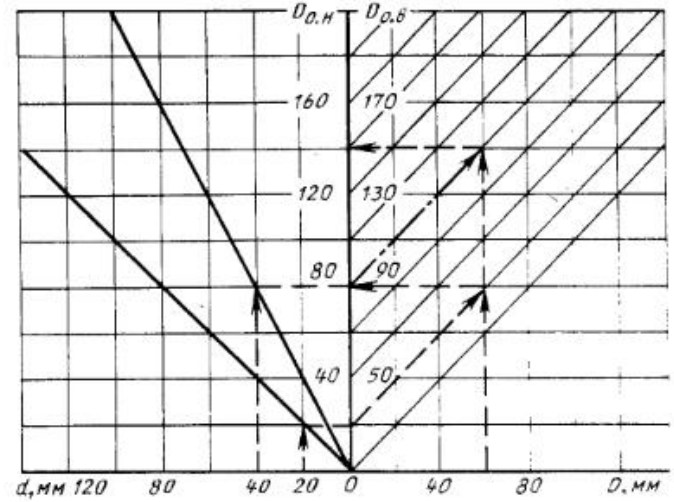
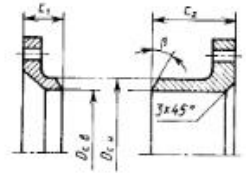
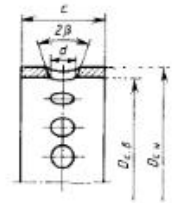
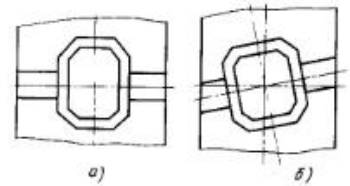
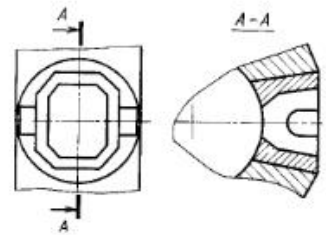


Рис. 20. Номограмма для определения размеров опорных колец роликовых устройств

18. Конструкция сепараторов

Вид сепаратора	Схема конструкции	Диаметр шарика, мм
Для шарикового устройства		
Составной, с входной и выходной частью		До 10
Целый		Св. 10
Для роликового устройства		
С пазами для размещения цапф роликов: параллельных оси оправки (схема *а*) и под углом к ней (схема *б*)		—
Со вставкой для самоустановки роликов		—

Примечание. Сепараторы изготовляют из латуней, алюминия, бронзы различных марок с обеспечением обработки поверхности $Ra = 0{,}2 \div 125$ мкм.

Основные размеры сепараторов определяют с помощью номограммы (рис. 21) или по формулам, приведенным ниже.

Наружный диаметр:
для шариковых устройств

$$D_{с.н} = d_ш (m + 1)$$

для роликовых устройств

$$D'_{с.н} = D_{о.в} = D + d + 10.$$

Внутренний диаметр:
для шариковых устройств

$$D_{с.в} = d_ш (m + 0{,}7);$$

для роликовых устройств

$$D'_{с.в} = D + d - 10.$$

Ширина сепаратора для шариковых устройств:
составного $c = c_1 + c_2 = 2B + 8 \ldots 10$ мм;
цельного $c \leqslant 23$ мм.

Ширина сепаратора для роликовых устройств

$$c = \frac{1{,}4p\sqrt{2r\Delta h}}{[\sigma_{см}]} \operatorname{ctg}\alpha + 6r_р.$$

Диаметр отверстия под шарик $d_1 = 0{,}95d_ш$; угол скоса сепаратора $\beta = 18°$.

В корпусе устройства размещаются опорные кольца, диаметр которых меньше диаметра корпуса на $0{,}34d_ш$ ($d_ш = 2r_р$). Превышение разности диаметральных размеров корпуса и колец приводит к перекосу последних в вертикальной плоскости и выпадению роликов. Размер внутреннего диаметра корпуса определяется максимальным диаметром деталей, изготовляемых на данном устройстве. Корпус устройства изготовляют из сталей марок 30, 45 и т. п.

Оправки для ротационной вытяжки деталей изготовляют с минимальным радиальным биением 0,03 мм. Чем тоньше стенка детали, тем более жесткий допуск устанавливают на биение. Оправку устанавливают в шпинделе токарного станка. Такой способ крепления наиболее предпочтителен, так как в этом случае исключается

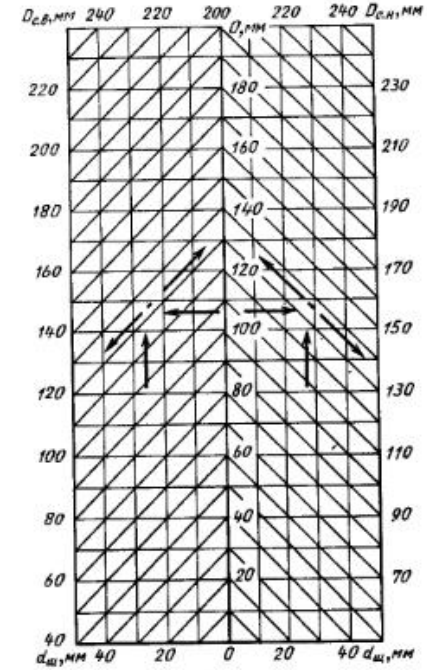


Рис. 21. Номограмма для определения размеров сепаратора

продольное перемещение оправки и обеспечивается минимальное биение.

Оправка должна иметь сквозное отверстие под выталкиватель, предназначенный для снятия деталей, имеющих дно.

Наружный диаметр оправки назначают исходя из минимальных внутренних размеров вытягиваемой детали, поля допусков на точность ее изготовления и величины минимального зазора между оправкой и стенкой заготовки.

Выбор материала для оправки зависит от характеристик материала детали. Так, для материалов деталей с большим относительным удлинением (низкоуглеродистые стали, цветные металлы) оправки изготовляют из инструментальных углеродистых сталей марок У10, У12, 30ХГСА и др., а при ротационной вытяжке трудноде формируемых материалов — из сталей 5ХНВ, ШХ15 и т. п.

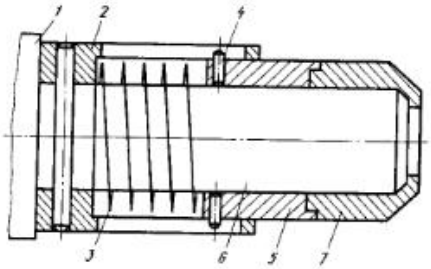


Рис. 22. Приспособление для полной фиксации положения заготовки на оправке:
1, 5 — втулки; *2, 4* — штифты; *3* — пружина; *6* — оправка; *7* — заготовка

После изготовления оправки подвергают термической обработке до $HRC > 60$, хромируют и полируют.

Наличие зазора между оправкой и заготовкой приводит к смещению заготовки относительно оправки в процессе вытяжки. Это вызывает необходимость применения специальных приспособлений, позволяющих фиксировать положение заготовки.

В качестве таких приспособлений используют прижимы, установленные в задней бабке токарного станка и действующие от штока гидро- или пневмоцилиндра. Однако при этом другой конец заготовки остается свободным и под действием тангенциальной составляющей усилия вытяжки скручивается на угол, величина которого зависит от механических свойств материала и величины деформации. Для ликвидации скручивания заготовки применяют приспособление (рис. 22), которое работает следующим образом. На оправку *6* устанавливают заготовку *7* так, чтобы в паз на заготовке входил выступ подвижной втулки *5*. Возникающий в процессе вытяжки скручивающий момент передается на подвижную втулку *5*. Штифты *4*, закрепленные на подвижной втулке *5*, предохраняют ее от проворота и, перемещаясь в пазах неподвижной втулки *2*, обеспечивают поступательное движение втулки *5*. Для более жесткого контакта между заготовкой и подвижной втулкой служит пружина *3*. Оправку размещают в шпинделе *1* станка.

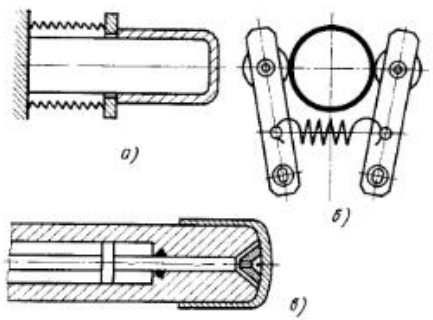


Рис. 23. Съемники:
а — пружинный; *б* — рычажный; *в* — гидро- и пневмосъемник с расположением в оправке

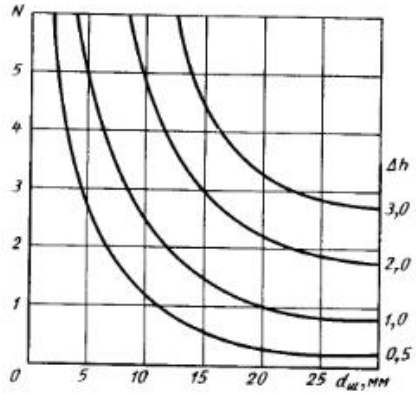


Рис. 24. Номограмма для определения числа *N* проходов

Как отмечалось выше, плотность посадки детали на оправке после окончания процесса может оказаться весьма значительной, поэтому предусматривают специальные приспособления-съемники, позволяющие снимать деталь с оправки. Конструкции съемников, показанные на рис. 23, *а*, применяют для снятия деталей малого диаметра, на рис. 23, *б* и *в* — для коротко- и длинноосных деталей большого диаметра.

Выбор технологических параметров. При применении для вытяжки тонкостенной заготовки, когда толщина ее стенки $H < 1{,}0 \div 2{,}0$ мм, процесс ротационной вытяжки может быть реализован за один проход с максимально допустимыми степенями утонения. Если толщина стенки заготовки $H > 2{,}0$ мм,

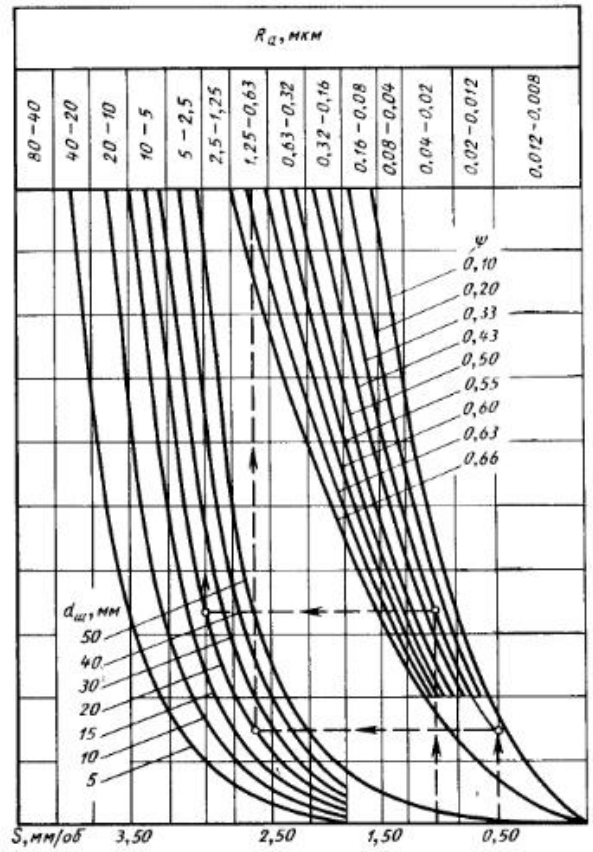


Рис. 25. Номограмма для определения шероховатости поверхности

число проходов определяют по формуле

$$N = \frac{\psi_\Sigma}{0{,}045 d_ш}, \qquad (35)$$

где ψ_Σ — суммарное утонение стенки заготовки.

Число проходов можно определить также с помощью графиков (рис. 24). Между проходами необходимо предусматривать термическую обработку.

Величину осевой подачи рассчитывают

$$S = c' (\psi)^4 m_{ш_т} H, \qquad (36)$$

где c' — коэффициент, характеризующий свойства материала.

Значения коэффициента c' в зависимости от материала заготовки следующие.

Сталь:	
12Х18Н10Т	0,55
10	0,51
45	0,49
Алюминиевые сплавы	
Д1; Д16Т	0,47
АМцМ	0,45

От величины осевой подачи зависит состояние поверхности детали. Для прогнозирования ожидаемой шероховатости поверхности может быть использована номограмма, приведенная на рис. 25.

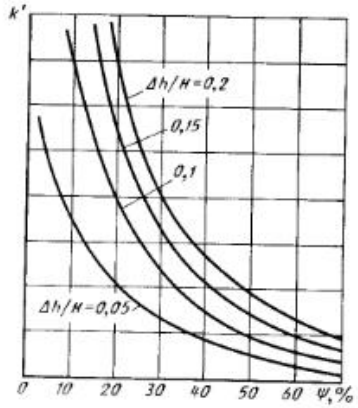


Рис. 26. Графики зависимости неравномерности деформации от степени утонения стенки оболочки

На размерную точность деталей существенное влияние оказывает исходный зазор между оправкой и внутренним диаметром заготовки. Необходимо, чтобы величина зазора была минимальной. Однако размещение заготовки на оправке с малым зазором затруднительно, и поэтому уменьшение зазора следует производить в процессе вытяжки, используя большие значения степени утонения и осевой подачи.

На точность размеров получаемой детали значительно влияет и разностенность заготовки. Скорость течения (деформации) материала на участках с тонкой и толстой стенкой неодинакова, что приводит к неравномерности смещения объемов материала, нарушению формы и размерной точности детали. Неравномерность деформации материала может быть охарактеризована коэффициентом k' (рис. 26). Предполагаемую разностенность δh получаемой детали определяют по формуле

$$\delta h = \delta H\,(1 - \psi), \qquad (37)$$

где δH — разностенность заготовки.

Деталь, снятая с оправки после формоизменения, не сохраняет стабильных размеров и имеет меняющуюся овальность, величина которой зависит от толщины стенки заготовки, механических свойств материала и режимов обработки. Полного устранения овальности деталей после ротационной вытяжки достичь невозможно, в связи с чем возникает необходимость ее учета при составлении технических условий на чертеж детали и разработке методов их контроля.

При соединении тонкостенной детали с парной деталью ее овальность устраняется Поэтому желательно нормировать средний диаметральный размер вытягиваемых деталей:

$$D_{ср} = 1/2\,(D_н + D_м), \qquad (38)$$

где $D_н$ и $D_м$ — наибольший и наименьший измеренные диаметры деталей, снятых с оправки. Вместе с допуском на диаметр δ необходимо задавать допуск на погрешность формы $\delta_ф$, т. е. на овальность:

$$\delta_ф = (D_н - D_м)_{max}. \qquad (39)$$

Среднее значение диаметра детали

$$D_{ср} = D_н - 0{,}5\delta_ф \qquad (40)$$

или

$$D_н = D_{ср} + 0{,}5\delta_ф. \qquad (41)$$

При $\delta_ф = \delta$

$$D_{н\,max} = D_{ср\,max} + 0{,}5\delta; \qquad (42)$$

$$D_{м\,max} = D_{ср\,max} - 0{,}5\delta. \qquad (43)$$

При назначении допуска на детали, измерение которых производят контрольным прибором, фиксирующим численные значения отклонений, используют формулы (42) и (43).

Производительность процесса ротационной вытяжки зависит от скорости деформирования заготовки. Однако при определенных соотношениях скорости осевого перемещения инструмента и окружной скорости заготовки процесс становится неустойчивым вследствие возникновения вибраций. Практикой установлено, что оптимальные значения окружных скоростей 150—350 м/мин. Для определения потребного усилия ротационной вытяжки шариковыми устройствами используют следующие зависимости:

$$P_O = 1000\sigma_в S H m_{шт} K_1 K_2;$$

$P_R = 0{,}8P_O$; $P_T = 0{,}4P_O$; $M = K_з P_T D$,

где $K_1 = 0{,}1 \div 0{,}2$; $K_2 = 0{,}02 \div 0{,}03$; $K_з$ — коэффициент запаса.

Составляющие усилия для роликовых устройств определяют по формулам (23)—(25). Мощность осевого перемещения инструмента вычисляют по значению P_O, а мощность станка определяют как сумму мощностей привода и осевого перемещения устройства.

Глава 13 ШТАМПОСБОРОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Штампосборочные операции применяют для соединения холодной штамповкой двух или нескольких деталей в одну сборочную единицу. Технология сборки штамповкой позволяет снизить металлоемкость сборочных единиц и, как правило, повысить их прочность и надежность. Примером может служить катодно-модулярный узел электронной оптики кинескопа, в котором после проработки на технологичность и использования штампосборочных операций число деталей существенно уменьшилось, вместо 14 стало четыре (рис. 1).

Штампосборочные операции основаны на использовании возможности пластического (или упругого) деформирования одной из соединяемых деталей под воздействием внешней силы.

В зависимости от формы, размеров и материала собираемых деталей штампосборочные операции производят на кривошипных или гидравлических прессах в штампах для холодной штамповки и для холодной сварки. Кроме того, штампосборочные операции можно осуществлять штамповкой взрывом, штамповкой электрическим разрядом в жидкости и штамповкой магнитными полями высокой напряженности. Сборку деталей производят с использованием формоизменяющих операций холодной штамповки, показанных на рис. 2. Ниже рассмотрены отдельные примеры сборки деталей в сборочные единицы.

Сборка холодной штамповкой. *Осадкой* получают головки заклепок, соединяющих отдельные детали. Заклепки могут быть цельные (рис. 3, *а*) или в виде цапфы (концевой участок одной из соединяемых деталей), входящей в отверстие другой детали (рис. 3, *б*). Осуществляют осадку всей головки полностью или отдельных ее участков (рис. 3, *в*). В авиационной промышленности применяют заклепки, имеющие в стержне взрывчатое вещество (взрывные заклепки), которое при осадке ударом способствует пластическому деформированию головки (рис. 3, *г*). Кроме того, заклепку можно получить прямым выдавливанием части объема металла одной из соединяемых деталей (рис. 3, *д*).

Запрессовкой соединяют детали, сопрягаемые размеры которых выполнены с натягом (рис. 4, *а*), с натягом в сочетании с осадкой клиновым инструментом (рис. 4, *б*), дорнованием (рис. 4, *в*). Запрессовкой соединяют замки биметаллических втулок, полученных гибкой (рис. 4, *г*).

Для соединения двух и более деталей *гибкой* применяют соединяющий элемент, например, скобу (рис. 5, *а—в*). Соединяющими элементами могут быть «лапки», являющиеся частью одной из соединяемых деталей (см. рис. 1 и рис. 5, *г, д*).

Сборку двух деталей, одна из которых листовая, а вторая — полученная обработкой резанием — имеет специальную канавку для соединения с другой деталью, можно осуществлять *упругим* или *упругопластическим изгибом*. При этом листовая деталь под действием внешней силы деформируется, после чего ее краевая часть попадает в канавку соединяемой с ней детали и там остается (рис. 6, *а, б*).

Элементы кровли, воздуховодов, ведра, тазы и т. п. соединяют гибкой в замок (в фальц) (рис. 6, *в*). Фальцевые соединения применяют при изготовлении деталей из листовых заготовок толщиной до 2 мм на фальцепрокатных станках ФП-3, ВМС-64 и др.

Кроме того, фальцевые соединения штампованных деталей толщиной до 2—2,5 мм получают *закаткой роликами* за один или два перехода на универсальных и специализированных давильных и давильно-раскатных станках. Схемы наладок для выполнения фальцевых соединений показаны на рис. 6, *г*.

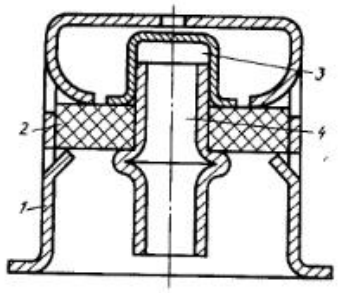


Рис. 1. Катодно-модулярный узел электронной оптики кинескопа:
1 — корпус; *2* — фиксатор; *3* — преобразователь; *4* — стержень

В зарубежной автомобильной промышленности применяют оригинальный *способ соединения гайки с панелью* (рис. 7). Сущность его заключается в том, что гайка *4* выполняет роль пуансона при опускании матрицы *1* для пробивки отверстия в панели *3*. При этом отход *2* остается в матрице, а краевой участок панели изгибается и попадает в кольцевую канавку гайки.

Раздачей можно соединять: листовые детали заклепками в виде втулок или полых стаканчиков (рис. 8, *а*); листовые детали с деталями в виде стержня с заплечиком и полой цапфой (рис. 8, *б*); кольцевые детали одна

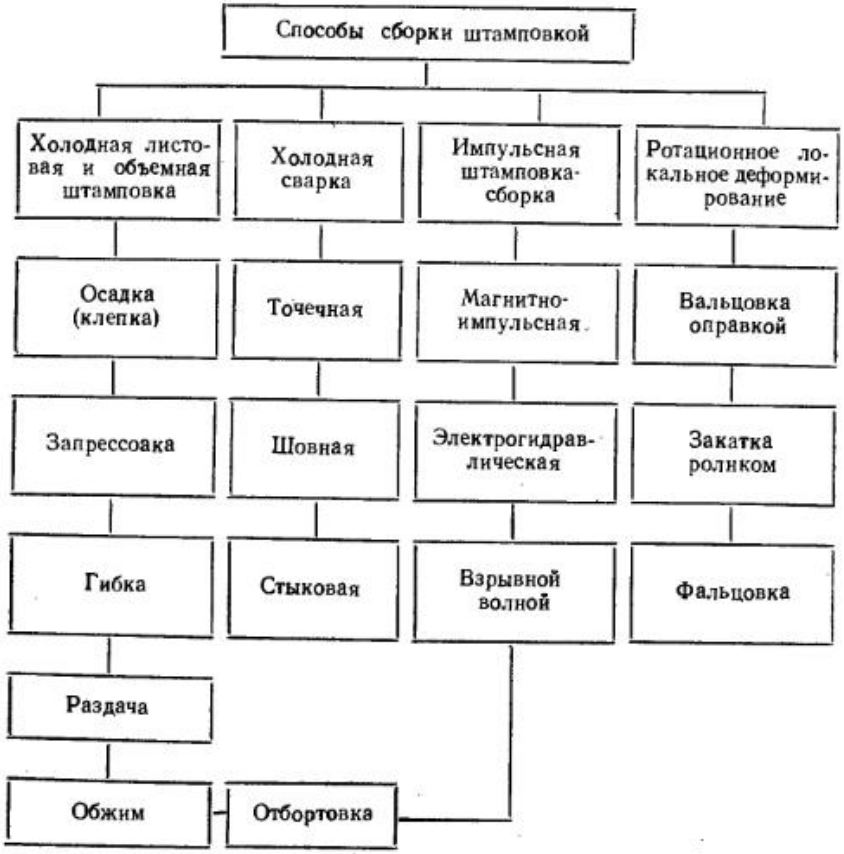


Рис. 2. Способы сборки штамповкой

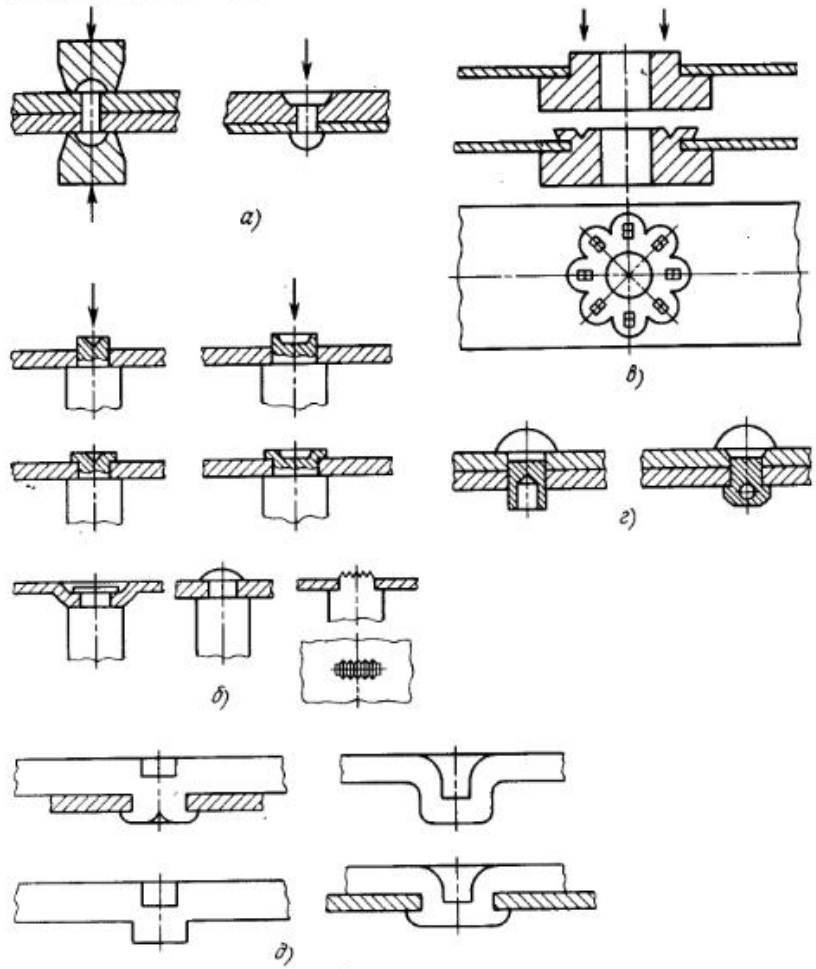


Рис. 3. Сборка осадкой и клепкой

с другой (рис. 8, *в*); трубчатые детали, например, носик чайника (рис. 8, *г*); трубчатые детали с деталями, получеными обработкой резанием (рис. 8, *д*); втулки, имеющие кольцевую канавку на внутренней поверхности с трубчатыми деталями при осадке вкладыша из полиуретана (рис. 8, *е*); втулки с трубчатыми деталями, имеющими коническое углубление (рис. 8, *ж*).

Сборку штампованных деталей с использованием операции обжима выполняют в штампах с жесткой или упругой (из полиуретана) матрицей. Рабочий инструмент для обжима жесткой матрицей показан на рис. 9, *а*, матрицей из полиуретана — на рис. 9, *б*. На рис. 9, *в* показан пример сборки обжимом подшипника качения с обоймой.

Сборка холодной сваркой. В листоштамповочном производстве для сборки деталей применяют точечную и шовную холодную сварку, которую выполняют в специальных штампах для холодной сварки, установленных

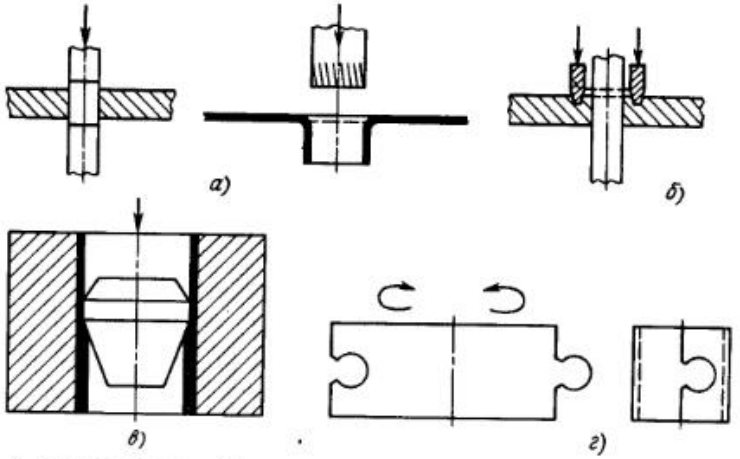


Рис. 4. Сборка запрессовкой

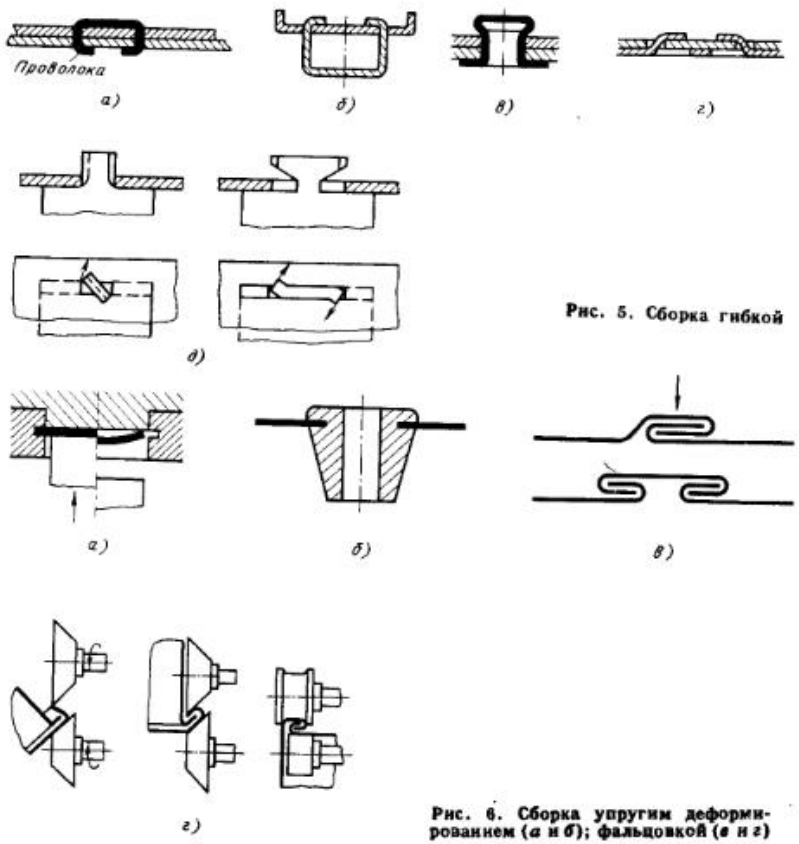


Рис. 5. Сборка гибкой

Рис. 6. Сборка упругим деформированием (*а* и *б*); фальцовкой (*в* и *г*)

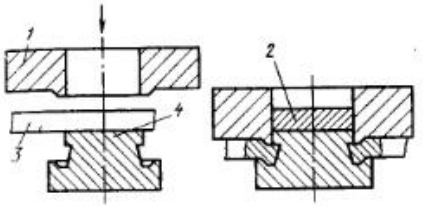


Рис. 7. Способ соединения самопробивающей гайки с панелью

на кривошипные и гидравлические прессы.

Точечной сваркой соединяют листовые плоские детали. Сварные точки образуются в местах приложения нагрузки пуансонами штампа (рис. 10, *а*).

Шовную холодную сварку применяют для герметичного соединения тонкостенных штампованных деталей, например, для соединения стаканчика, полученного вытяжкой, и штампованной крышки. На рис. 10, *б* показан рабочий инструмент для холодной сварки стаканчика с крышкой и отделения отхода. Сварка происходит одновременно по всей контактной поверхности соединяемых деталей; выступающие кольцевые участки пуансона и матрицы пережимают отход и отделяют его.

Приварку дна (или перегородки) к цилиндрическому корпусу осуществляют по схеме, показанной на

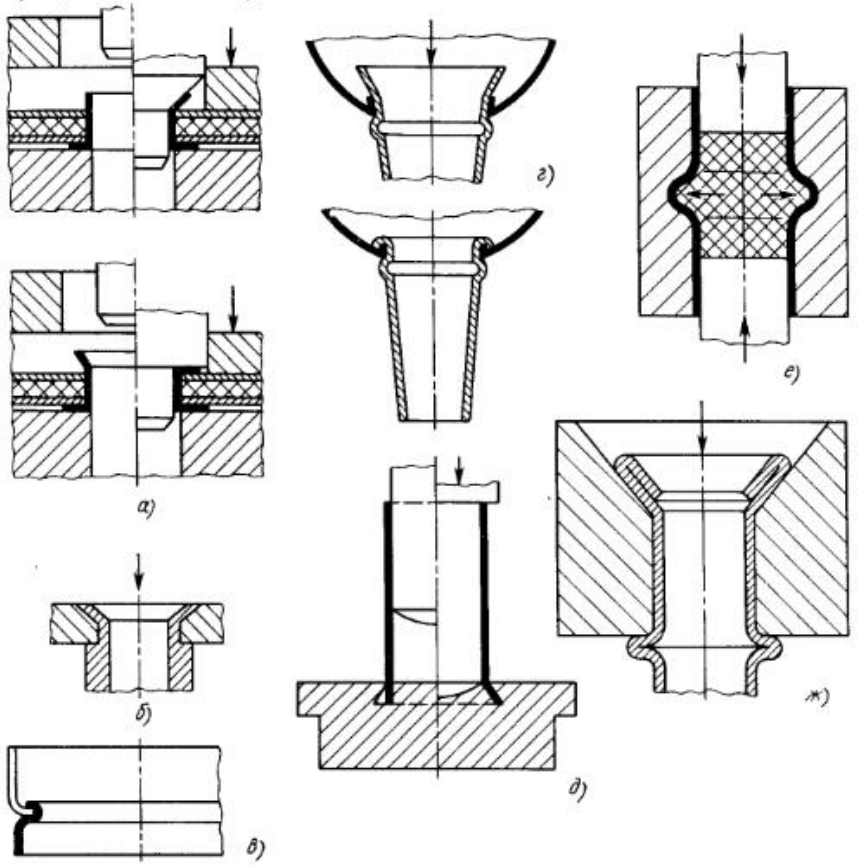


Рис. 8. Сборка раздачей

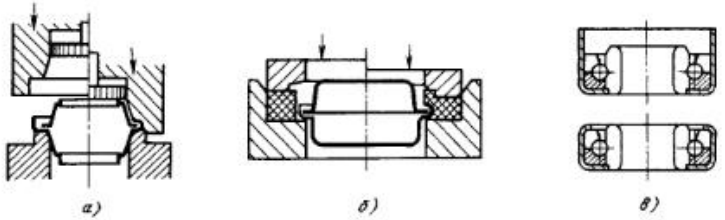


Рис. 9. Сборка обжимом

рис. 10, *в*. Краевой участок корпуса подвергают раздаче на угол около 5°, после чего помещают его в кольцевую матрицу. Дно (или перегородку) устанавливают в корпус и вдавливают его пуансоном на необходимую глубину.

Деформация при холодной сварке

$$\varepsilon = \ln\left[\sum / \left(\sum s - \sum h\right)\right],$$

где $\sum s = s_1 + s_2$ — суммарная толщина свариваемых деталей; $\sum h = h_1 + h_2$ — суммарная глубина внедрения пуансонов.

Минимальная глубина внедрения пуансонов при точечной холодной сварке, необходимая для получения прочного соединения (по данным Н. М. Строймана) для различных металлов, имеет следующие значения.

Алюминий	(0,6÷0,7) $\sum s$	Индий	(0,1÷0,15) $\sum s$
Алюминиевые сплавы	(0,75÷0,9) $\sum s$	Железо Армко	(0,85÷0,92) $\sum s$
Медь	(0,85÷0,9) $\sum s$	Серебро	(0,50÷0,86) $\sum s$
Свинец	(0,55÷0,85) $\sum s$	Кадмий	(0,80÷0,86) $\sum s$
Олово	(0,86÷0,88) $\sum s$	Титан	(0,7÷0,75) $\sum s$
Золото	(0,30÷0,35) $\sum s$	Никель	(0,85÷0,9) $\sum s$

Прочность сварной точки составляет 0,75—0,9 прочности основного металла (при сварке биметаллов она соответствует прочности менее прочного из соединяемых металлов).

Холодную сварку применяют для соединения цветных металлов и их сплавов (алюминия, меди и др.). При этом происходит взаимодействие поверхностных слоев металлов; локальная пластическая деформация $\varepsilon = 0{,}6 \div 0{,}7$. В результате этого происходит выдавливание металла из-под пуансонов, разрыв окисных пленок, выход зерен чистого, незагрязненного металла на контактную поверхность и образование молекулярно-кристаллического соединения. Процесс соединения состоит из трех стадий: образование физического контакта, активизация контактных поверхностей и объемное взаимодействие.

Сближение контактных поверхностей на расстояния, при которых возникают межатомные силы, достигается приложением больших нагрузок, вызывающих пластические деформации. Очистка сопрягаемых контактирующих поверхностей соединяемых деталей от адсорбированных веществ, окисных пленок и обеспечение контакта между свежеобразующимися — чистыми (ювенильными) поверхностями является обязательным условием для осуществления холодной сварки.

Шовную холодную сварку выполняют также с помощью роликов, вращающихся в противоположные стороны. При одностороннем способе сварки один ролик имеет выступ, а другой — гладкий, при двустороннем — выступы должны иметь оба ролика (см. рис. 10, *г*, *д*). Разновидностью данного вида сварки является шовно-точечная сварка (см. рис. 10, *д*). Диаметр роликов должен быть в 50—60 раз больше толщины свариваемых деталей, а ширина их выступов (рабочей части) примерно соответствовать толщине одной детали.

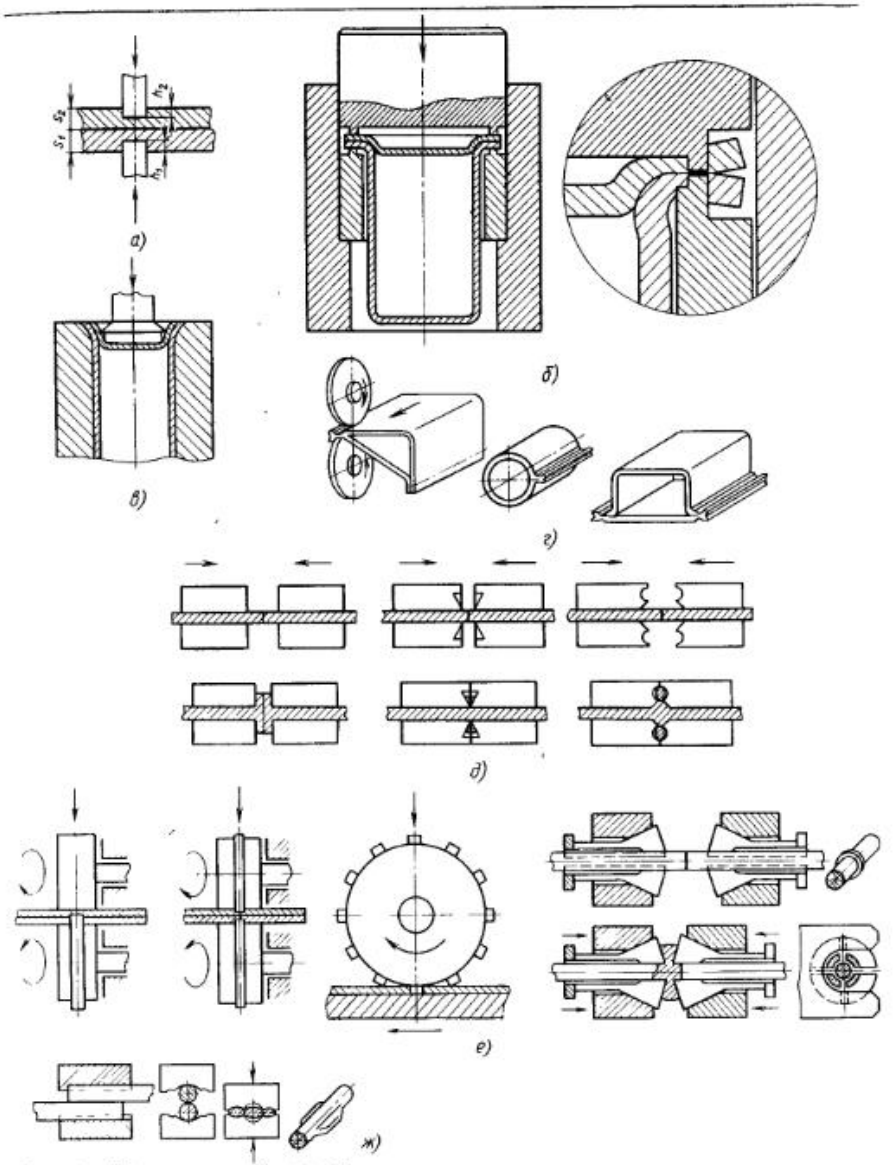


Рис. 10. Сборка холодной сваркой

Условием осуществления *стыковой сварки* является создание встречного соосного давления на соединяемые

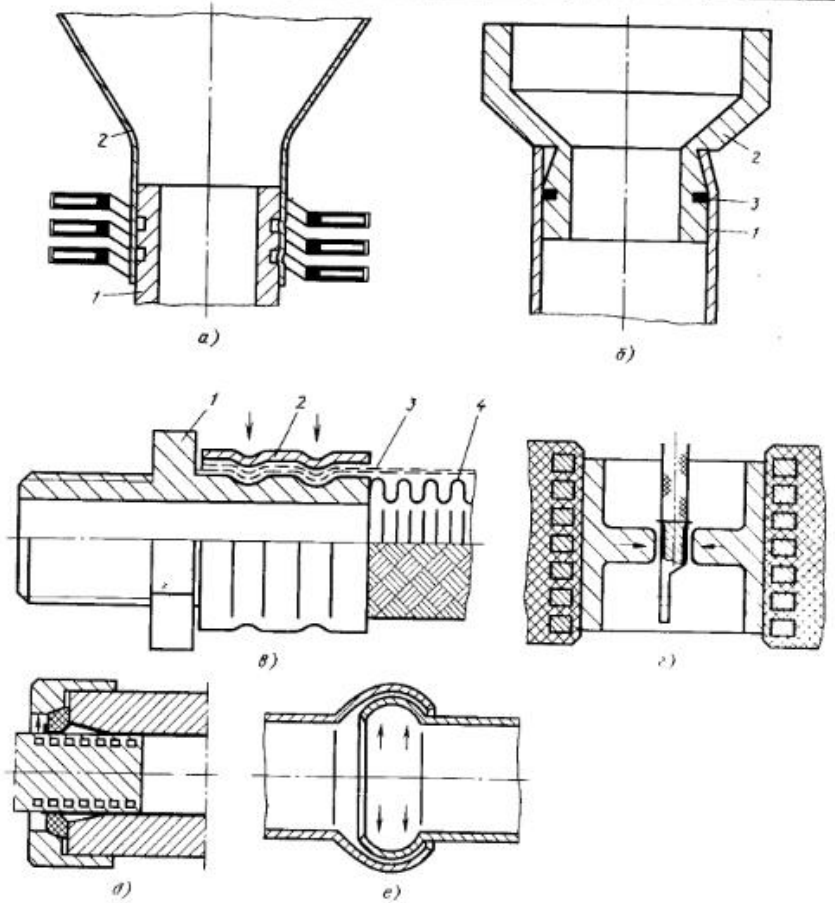


Рис. 11. Сборка высокоскоростными импульсными методами

деталн. Для этого деталн зажнмают в спецнальных губках с некоторым вылетом. Губки фактнчески представляют матрнцы для облоя. По форме это кольцевые канавки или канавки, состоящне нз трех полостей. Губкн могут быть н гладкнмн (рис. 10, *д*). Этнм способом выполняют нахлесточные свариые соедннення (рис. 10, *ж*).

Деформация при стыковой сварке

$$\varepsilon = \ln (F_1/F_0),$$

где F_0 н F_1 — площади сеченнй деталн соответственно до сварки н в максимальном сеченнн после сваркн.

Одновременно с поступательным движением навстречу друг другу деталн могут нметь н вращательное движенне — происходнт сварка треннем. Так соединяют валы сельскохозяйственных машни н т. п. Длнну свободного вылета соединяемых деталей определяют нз условня сохранения устойчивостн прн высадке; как правило, она составляет (0,9÷1,6) d, где d — нсходный диаметр заготовкн.

Существуют н другне способы сборки с помощью холодной сварки: сварка тавровых соеднненнй, сборка сдвигом, клепкой, прокаткой, протягнваннем, прессованнем и др.

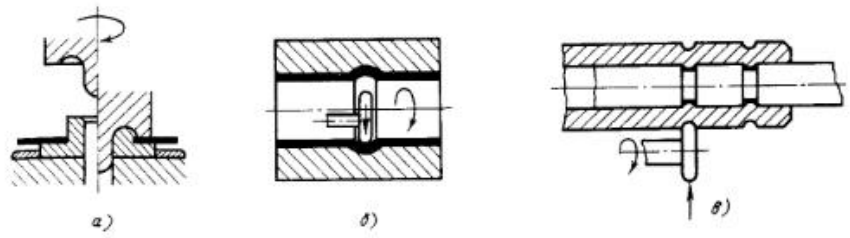


Рис. 12. Сборка ротацнонной вальцовкой

Сборка импульсной обработкой. Для сборки металлических деталей, а также для соедннення металлических деталей с деталямн нз других конструкцнонных материалов (пластмассы, фарфора, резины) применяют высокоэнергетические импульсные методы обработки, к числу которых отнесятся штамповка импульсным магнитным полем высокой напряженности, электрогидравлическая импульсная обработка, сборка-штамповка взрывом.

Сборка с использованнем импульсной энергии отличается высокой скоростью приложения нагрузкн [до $1/(50 \cdot 10^3)$ с$^{-1}$]; ее выполняют в специальных установках.

Высокоскоростной характер приложения нагрузки существенно улучшает условия деформированнн — повышается температура очага деформацни, возникают полезные снлы инерцни, уменьшаются силы трения, локализуется очаг деформации.

Для сборки мелких и средних деталей наиболее широко прнменяют магнитно-импульсные промышленные установки МИУ 40/10, МИУ 80/10, МИУ 80/20 н др., в которых давленне на соединяемые детали создается непосредственным воздействием нмпульсного магнитного поля без какнх-либо промежуточных твердых, жндкнх нли газообразных сред.

В качестве прнмера на рнс. 11, *а* показана технологическая схема сборки двух деталей — оправкн *1* и кожуха *2*. Оправка днаметром 46 мм нз стали 20 нмеет две кольцевые каиавкн. Кожух днаметром 46,4 мм нз стали 10 нмеет толщнну стенкн 1,5 мм. Применение магнитно-нмпульсной сборки по сравненню с закаткой роликом существенно повыснло соосность соединяемых деталей н снизило брак по надрывам в местах стыка.

Технологическая схема сборки трубы *1* с переходником *2* показана на рис. 11, *б*. Резиновая манжета *3*, установленная на цилиндрическом участке переходника, осуществляет герметизацию этого соединения, оно рассчитано на давление воздуха до 30 МПа. Сборку осуществляют обжатием краем трубы коннческой поверхностн переходника. Материал соединяемых деталей — сплав АМг6. Резьбовое соединение этих деталей с герметизацией лаком н герметнком значительно увеличнвает трудоемкость сборки.

Присоединение оплетки *3* к концевой арматуре *1* гнбкого шланга *4* выполняют обжнмом втулки *2* на магнитно-импульсной установке (рнс. 11, *в*). Замена сварки на импульсную обработку позволило существенно уменьшить трудоемкость сборки н повысить прочность соединения.

Магнитно-импульсной обработкой пронзводят обжатие наконечников на тросах, раздачу металлнческой трубы внутри нзолятора, раздачу двух труб в полусферической разъемной матрнце (рнс. 11, *г—е*).

Металл с низкой электропроводнмостью н, следовательно, с высокнм электрнческим сопротнвленнем (сталь, титан н др.) штампуется хуже, чем цветные металлы (медь, алюмнний, латунь н др.). Для улучшения штампуемостн заготовкн нз металлов с низкой электропроводнмостью покрывают тонкнм слоем медн нлн алюмнння электролнтнческим способом или используют прокладки («спутники») из меди

нлн алюминия, которые помещают между заготовкой и индуктором импульсной установки. Сборке подвергают трубы диаметром до 300 мм (н даже более), толщиной 3—5 мм — для сплавов медн, латуни, стали н до 10 мм — для легких сплавов на основе алюминия.

Сборка-штамповка взрывом применяется для соединения деталей как из пластичных, так н из малопластичных металлов н сплавов. В зависимости от размеров заготовок процесс осуществляют в стацноиарных установках бассейнового типа или в передвижных бронекамерах. При этом нспользуют взрывчатые вещества, а также газовые смеси.

Электрогидравлическая импульсная сборка имеет те же преимущества, что и сборка-штамповка взрывом. Этот способ соединения прнмеияют для сборки трубчатых деталей обжимом и раздачей, отбортовкой и формовкой, запрессовкой и развальцовкой, закаткой, гибкой и др. Способ является более пронзводнтельным и экономичным, чем предыдущий, позволяет многократно (без переналадки) последовательно по участкам или по всей поверхиости производить соединение собираемых деталей. На специальных промышлениых установках типа Удар-1М, Т1220, ПЭГ-150 можно осуществлять сборку деталей диаметром до 2000 мм.

Сборка ротационным локальным деформированием (вальцовкой). Сборку деталей вальцовкой осуществляют вращающимся инструментом в виде оправки, состоящей из заходной конусной части и рабочей части в виде лопатки с симметрично расположенной кольцевой канавкой. Оправку закрепляют в патроне вальцовочного станка. При опускании шпинделя заходная часть оправки входит в отверстие полой цапфы, пластически деформирует ее, образуя головку в форме полутора (рнс. 12, *а*).

Сборку вальцовкой применяют для соединения разнородных конструкционных материалов (металл — стекло, металл — пластмасса н др.), когда сварка, пайка и склеивание не обеспечивают требуемой прочности соединения.

Схемы сборки ротационной вальцовкой снаружи и внутри трубных деталей показаны на рнс. 12, *б* и *в*.

Глава 14 РАСКРОЙ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

Проектирование раскроя листового материала, в результате которого определяют коэффициент использования материала, является важнейшим этапом разработки технологического процесса. В общих расходах на изготовление, т. е. в себестоимости изделий листовой штамповки, затраты на материал достигают 50—70 % и более. Но снижение затрат на материал в ряде случаев приводит к увеличению сложности инструментально-штамповочной оснастки и оборудования. Задачи оптимизации технологического процесса штамповки в целом решаются только при комплексном рассмотрении технико-экономических показателей, характеризующих производство.

Вариант процесса листовой штамповки определяется видом исходного материала, видом заготовки, поступающей на основные штамповочные операции, типом раскроя нли числом рядов при раскрое, конструкцией штампа, уровнем организации, механизации и автоматизации производства.

Операции раскроя материала. Операции раскроя материала обычно выполняют на специальных раскройно-заготовительных участках. Материал разрезают на ленты, полосы или карточки различной формы с помощью гильотинных и дисковых ножниц. При этом производятся следующие операции: обрезка дефектных кромок листов; отрезка полей листов для получения размеров, кратных соответствующим размерам заготовок в виде полос, карточек; разрезка на полосы, карточки.

На гильотинных ножницах, как правило, выполняют разрезку листа на крупные штучные заготовки прямоугольной, трапецеидальной, ромбовидной и треугольной формы. При вырезке крупногабаритных деталей, а также при параллельном раскрое получаются большие отходы по краям заготовок; экономию материала удается получить при применении косого раскроя полос из листа (рис. 1). Для мелкосерийного производства, как правило, применяют комбинированный раскрой, когда лист раскраивают на полосы неодинаковой ширины для вырубки из них различных деталей (рис. 2). При комбинированном раскрое получают более высокий коэффициент используемого материала. На дисковых ножницах осуществляют разрезку листа на полосы. Для разрезки листа на полосы все большее распространение получает также лазерная резка.

Принцип лазерной резки заключается в том, что острофокусированный лазерный луч направляют на поверхность материала. Под его воздействием металл быстро расплавляется. Пары и жидкий металл удаляются из зоны резания потоком инертного газа, кислорода или воздуха. Применение кислорода позволяет значительно повысить скорость и качество резки за счет получения дополнительного тепла в ходе экзотермической реакции кислорода с материалом. Пригодность материалов к лазерной резке зависит от степени поглощения ими лазерного излучения, а также их теплопроводности. Хорошо поддаются лазерной резке неметаллы — керамика, кожа, ткань, древесина и т. п.; практически не поддаются ей материалы с высоким коэффициентом отражения и высокой теплопроводностью — медь, латунь, золото, серебро и т. п.

Для резки используют лазерные установки мощностью 250—6000 Вт. Диаметр лазерного пучка после прохождения фокусирующей линзы составляет 0,2—0,3 мм. Благодаря этому ширина реза не превышает 0,2—0,5 мм. Скорость резки материалов прямо пропорциональна мощности излучения лазера и обратно

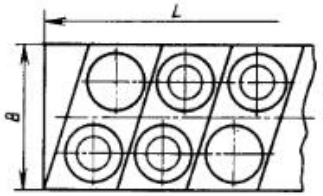


Рис. 1. Косой раскрой полос из листа

пропорциональна толщине материала, его теплопроводности и площади фокального пятна.

Отечественные лазерные установки мощностью 500—1000 Вт обеспечивают приемлемые для практических целей скорости резания — несколько метров в минуту и позволяют получать разрезы сложной конфигурации.

Мощные лазерные установки дают возможность разрезать сталь толщиной до 5 мм (коррозионно-стойкую сталь — до 4 мм), пластики — до 30 мм. Скорость резки стали толщиной 2 мм — 2,5 м/мин; стали с покрытием толщиной 1,5 мм — 5 м/мин; хромоникелевых сплавов толщиной 2 мм — 1,5 м/мин.

Фирмой Raskin (ФРГ) создан станок ZRF модели 4201 для резки листовых материалов на базе лазера мощностью излучения 50—600 Вт со скоростью резки 0,1—10 м/мин. Фирмой Trumpf (Япония) создан лазерный станок Trumatic 180 K, состоящий из дыропробивного пресса и устройства для резки листового материала и предназначенный для автоматизированного производства деталей средними и мелкими сериями.

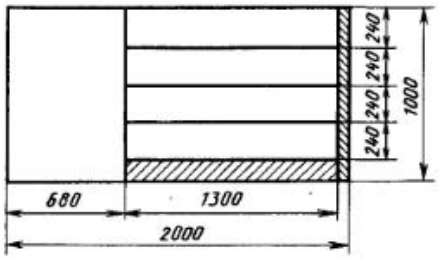


Рис. 2. Комбинированный раскрой

Преимущества лазерной резки по сравнению с традиционными методами следующие: возможность получения узкого реза с малой зоной теплового воздействия; минимальные неровности поверхности реза и малые деформации; отсутствие физического контакта с «инструментом»; возможность обработки сверхмягких, сверхтвердых, тугоплавких, токсичных и других материалов; возможность получения контура сложной формы и полной автоматизации процесса. Лазерная резка листа на полосы может быть заменена другой технологией. Так, для листового металла толщиной 5—100 мм экономически более эффективна плазменная резка, а также резка эрозионным способом.

Для получения деталей (заготовок) прямоугольной, трапецеидальной формы, а также с криволинейным контуром применяют автоматические раскройные линии для резки из широкорулонного проката. Использование таких линий позволяет сократить расход металла на 3 % и повысить производительность труда на заготовительных операциях в 5—10 раз.

Для раскроя рулонного материала на ленты и карты применяются специальные линии для поперечного и продольного раскроя. По сравнению с использованием листа это обеспечивает лучшее использование металла за счет снижения отходов. На указанных линиях выполняется продольный раскрой широкой ленты на более узкие, поперечный раскрой рулонной стали на карты, штамповка непосредственно из рулона; смешанный раскрой, совмещающий продольный и поперечный.

Если контур разделения при раскрое листового металла криволинейный замкнутый или незамкнутый, для вырубки применяются штампы. Контуры вырубаемых заготовок должны быть удалены друг от друга на величину технологической перемычки. Основное назначение перемычки — компенсировать погрешности подачи материала и фиксации его в штампе с тем, чтобы обеспечить полную вырубку детали по всему контуру и предотвратить получение бракованных деталей. Ширину перемычки выполняют наименьшей для снижения расхода материала, а также для уменьшения усилий, необходимых для снятия материала с пуансона. Но размеры перемычек должны учитывать допуски на ширину полосы, ленты и возможные неточности подачи материала в штамп для исключения разрыва отхода материала при подаче полосы и попадания его в матрицу при вырубке.

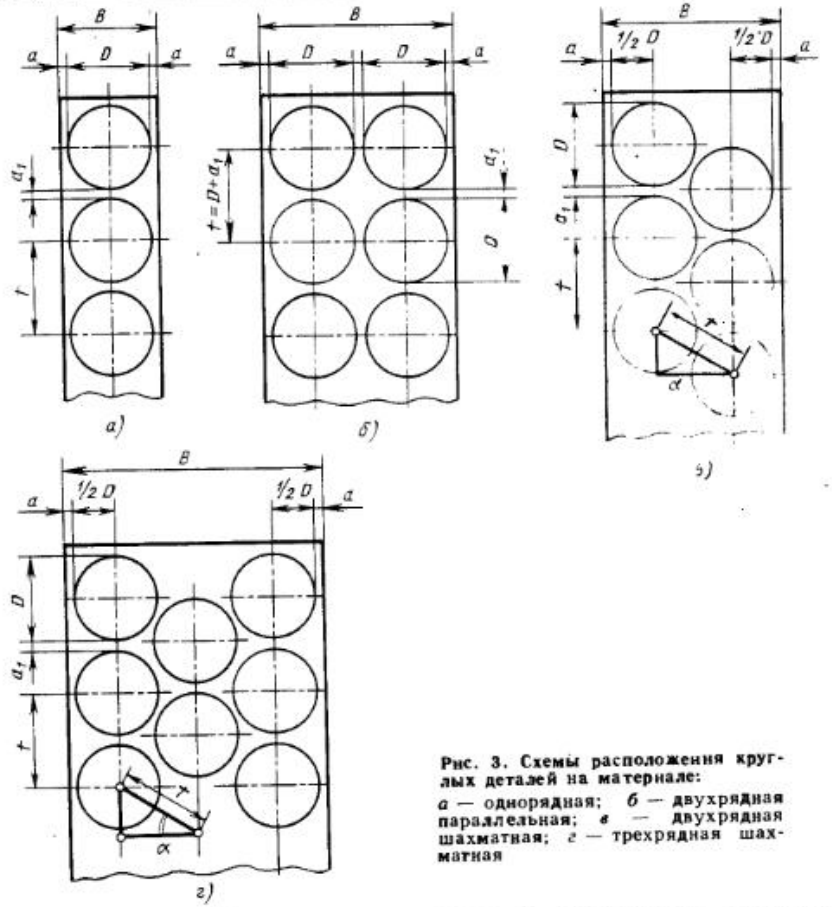


Рис. 3. Схемы расположения круглых деталей на материале:
а — однорядная; *б* — двухрядная параллельная; *в* — двухрядная шахматная; *г* — трехрядная шахматная

Перемычка между контурами деталей называется межконтурной и обозначается a_1. Перемычка между контуром детали и краем полосы называется боковой и обозначается a (рис. 3).

Размер перемычки зависит от толщины и твердости материала, от размеров и конфигурации вырубаемой детали, от способа подачи полосы (с боковым прижимом или без него), от типа раскроя (прямой, встречный, с поворотом полосы и т. д.), а также частично от типа упора (подвижный, неподвижный, шаговый и т. д.). Уменьшение перемычки может быть достигнуто применением бокового прижима полосы, точной фиксацией ленты ловителем или другими способами.

Размеры межконтурной и боковой перемычек приведены в табл. 1 и 2. При вырубке на пластинчатых штампах при толщине материала меньше 3 мм размеры перемычек следует увеличить в 1,5—2 раза по сравнению с табличными данными.

1. Минимальные размеры перемычек при однорядной вырубке круглого и овального контуров и ручной подаче металла (размеры, мм)

Толщина металла s	$\sigma_в$, МПа	Диаметр D							
		До 50		Св. 50 до 100		Св. 100 до 200		Св. 200	
		a_1	a	a_1	a	a_1	a	a_1	a
До 0,2	До 245	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5	2,2	2,8
	Св. 245	1,0	1,3	1,2	1,5	1,5	1,7	1,8	2,0
Св. 0,2 до 0,5	До 245	1,3	1,8	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5
	Св. 245	0,8	1,2	1,0	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0
Св. 0,5 до 1,0	До 245	1,0	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0	1,8	2,3
	Св. 245	0,7	1,1	1,0	1,3	1,2	1,5	1,4	1,8
Св. 1,0 до 1,5	До 245	1,3	1,8	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5
	Св. 245	1,0	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0	1,8	2,3
Св. 1,5 до 2,0	Для всех штампуемых металлов	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5	2,2	2,8
» 2,0 » 2,5		1,8	2,3	2,0	2,5	2,3	2,8	2,5	3,0
» 2,5 » 3,0		2,0	2,5	2,2	2,7	2,5	3,0	2,8	3,3
» 3,0 » 3,5		2,5	3,0	2,7	3,2	3,0	3,5	3,2	3,8
» 4,0 » 5,0		3,0	3,5	3,2	3,7	3,5	4,0	3,7	4,3
» 5,0 » 6,0		3,5	4,0	3,7	4,3	4,0	4,5	4,2	4,8
» 6,0 » 7,0		4,0	4,5	4,2	4,8	4,5	5,0	4,8	5,3
» 7,0 » 8,0		4,5	5,0	4,7	5,3	5,0	5,5	5,3	5,8
» 8,0 » 9,0		5,0	5,5	5,3	5,8	5,5	6,0	5,8	6,3
» 9,0 » 10,0		5,5	6,0	5,7	6,3	6,0	6,5	6,3	6,8
» 10,0 » 11,0		6,5	7,0	6,7	7,3	7,0	7,5	7,3	8,0
» 11,0 » 12,0		7,5	8,0	7,7	8,3	8,0	8,5	8,3	9,0
» 12,0 » 13,0		8,5	9,0	8,7	9,3	9,0	9,5	9,3	10,0
» 13,0 » 14,0		9,5	10,0	9,7	10,3	10,0	10,5	10,3	11,0
» 14,0 » 15,0		10,5	11,0	10,7	11,3	11,0	11,5	11,3	12,0

Примечания: 1. При вырубке деталей с поворотом полосы, а также для неметаллических материалов (картон, текстолит и др.) размеры a_1 и a необходимо увеличивать в 1,5—2 раза.

2. При работе с автоматической подачей штампуемого материала размеры a_1 и a рекомендуется увеличивать в 1,2 раза.

3. При многорядной штамповке размер a_1 может быть уменьшен в 2—3 раза.

4. При штамповке с шаговым ножом размер a следует умножать на 0,75.

2. Минимальные размеры перемычек при однорядной вырубке прямоугольного и фасонного контуров и ручной подаче металла (размеры, мм)

Толщина металла s	$\sigma_в$, МПа	Размер L							
		До 50		Св. 50 до 100		Св. 100 до 200		Св. 200	
		a_1	a	a_1	a	a_1	a	a_1	a
До 0,2	До 245	2,0	2,5		3,0		3,5		4,0
	Св. 245	1,5	2,0		2,5		3,0		3,5
Св. 0,2 до 0,5	До 245	1,8	2,3		2,8		3,3		3,8
	Св. 245	1,3	1,8		2,3		2,8		3,3
Св. 0,5 до 1,0	До 245	1,5	2,0		2,5		3,0		3,5
	Св. 245	1,1	1,6		2,0		2,5		3,0
Св. 1,0 до 1,5	До 245	2,0	2,5		3,0		3,5		4,0
	Св. 245	1,5	2,0		2,5				
Св. 1,5 до 2,0	Для всех штампуемых металлов	2,0	2,5	2,2	2,7	2,5	3,0		3,5
» 2,0 » 2,5		2,2	2,8	2,5	3,0		3,5		4,0
» 2,5 » 3,0		2,5	3,0		3,5		4,0		4,5
» 3,0 » 4,0		3,0	3,5		4,0		4,5		5,0
» 4,0 » 5,0		3,5	4,0		4,5		5,0		5,5
» 5,0 » 6,0		4,0	4,5		5,0		5,5		6,0
» 6,0 » 7,0		4,5	5,0		5,5		6,0		6,5
» 7,0 » 8,0		5,0	5,5		6,0		6,5		7,0
» 8,0 » 9,0		5,5	6,0		6,5		7,0		7,5
» 9,0 » 10,0		6,0	7,0		7,5		8,0	8,5	9,0
» 10,0 » 11,0		7,0	8,0		8,5		9,0		10,0
» 11,0 » 12,0		8,0	9,0		9,5		10,0		11,0
» 12,0 » 13,0		9,0	10,0		10,5		11,0		12,0
» 13,0 » 14,0		10,0	11,0		11,5		12,0		13,0
» 14,0 » 15,0		11,0	12,0		12,5		13,0		14,0

Примечание. См. примечание к табл. 1.

3. Допуски (минусовые) на ширину полос длиной до 1 м (размеры, мм)

Толщина s	Ширина $b_н$	Допуск $\Delta_ш$
До 1	До 100	0,4—0,5
	Св. 100 до 300	0,6—0,8
1—3	До 100	0,5—0,8
	Св. 100 до 300	0,7—1,1
3—5	До 100	0,9—1,1
	Св. 100 до 300	1,2—1,4

Определение ширины полосы. Расчет номинальной ширины полосы проводят исходя из условия сохранения минимально необходимой ширины боковых перемычек при различных способах подачи и допусков по ширине полосы. Номинальную ширину $b_н$ полосы определяют по следующим формулам:

при условии работы с боковым прижимом

$$b_н = b_р + \Delta_ш; \qquad (1)$$

при условии работы без бокового прижима

$$b_н = b_р + 2\Delta_ш + z, \qquad (2)$$

где $b_р$ — расчетная ширина полосы; $\Delta_ш$ — односторонний (минусовый) допуск на ширину полосы; z — гарантированный зазор между направляющими штампа и максимально возможной шириной полосы.

При штамповке с боковым прижимом номинальная ширина полосы не зависит от гарантированного зазора z, что позволяет применять в этом случае ленты или полосы, менее точные по ширине. При штамповке без бокового прижима гарантированный зазор должен быть выдержан с отклонениями в возможно меньших пределах, иначе может произойти выход контура вырубки за край полосы.

Допуски на ширину полос и лент в зависимости от штампуемого материала принимают по соответствующим государственным стандартам. При получении полос на гильотиниых ножницах допуски на ширину полос длиной до 1 м зависят от толщины и ширины полосы (табл. 3).

Гарантированный зазор при штамповке без бокового прижима полосы составляет: для однорядного раскроя 0,5—1,0 мм при ширине полосы до 100 мм и 1,0—1,5 мм при ширине полосы свыше 100 мм; при встречном раскрое — соответственно 1,5—2,0 мм и 2,0—3,0 мм.

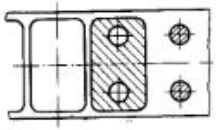
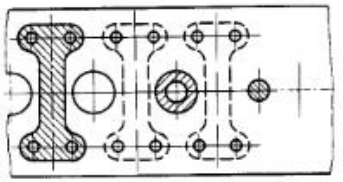
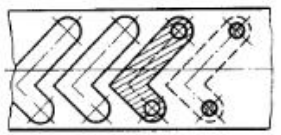
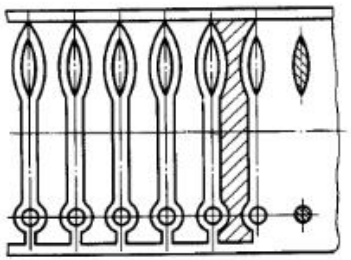
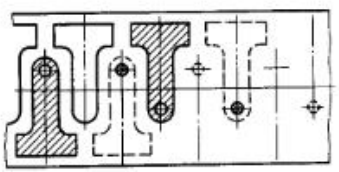
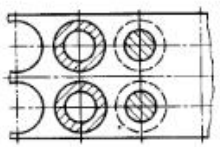
Выбор раскроя материала. В листоштамповочном производстве применяют несколько способов раскроя материала при вырубке деталей (заготовок).

Наиболее распространенный способ выбора схем раскроя, при котором детали (заготовки), получаемые разделительными операциями, классифицируют по форме наружного контура на конструктивные виды: круглые, квадратные, прямоугольные, шестигранные, удлиненной формы, трапецендальные, Г-, Т-, П-, Ш-образные, сложные. Классифицируют также типы раскроя (табл. 4). По каждому типу раскроя имеется рекомендация, для каких конструктивных видов заготовок его целесообразно применять. Для каждой заготовки выбирается тип раскроя, схема ее размещения на материале, обеспечивающая наибольший коэффициент его использования. При применении в качестве исходного материала листа определяют наиболее целесообразный его раскрой на полосы (продольный или поперечный) [65]. Для раскроя, обеспечивающего наилучшее использование материала, вычисляют норму его расхода.

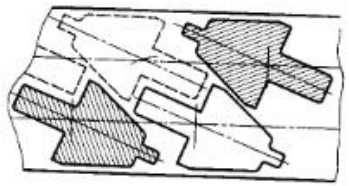
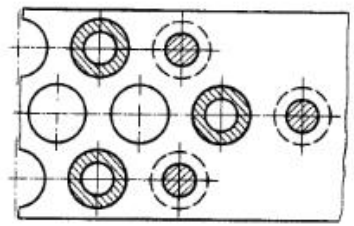
Расчет норм расхода материала при вырубке круглых деталей (заготовок). Вырубку круглых деталей можно производить из листа, полосы, ленты, рулона в один, два и более рядов при их параллельном и шахматном расположении, т. е. имеется несколько вариантов раскроя.

При раскрое листа на полосы и однорядной вырубке деталей из полосы

4. Основные типы раскроя листового материала

Тип раскроя и применение	Тип раскроя и применение
Прямой  Для деталей простой геометрической формы (прямоугольной, круглой, квадратной)	Комбинированиый  Для двух различных деталей, одинаковых по толщине и марке материала, в крупносерийном и массовом производстве
Наклонный  Для деталей Г-образиой формы или другой сложной конфигурации, которые при прямом расположении дают большие отходы материала	С вырубкой перемычки  Для мелких и узких деталей или для последовательиой вытяжки в ленте в крупиосерийном и массовом производстве
Встречный прямой  Для деталей Т-, П-, Ш-образной конфигурации, которые при прямом или наклоиом расположеиии дают большие отходы	Многорядный с параллельным расположеннем деталей  Для квадратиых, прямоугольиых, круглых, шестигранных деталей иебольших размеров в крупносерийном и массовом производстве

Продолжение табл. 4

Тип раскроя и применение	Тип раскроя и применение
Встречный наклонный  Для деталей Т-образной конфигурации, которые при прямом, наклонном и встречном прямом расположении дают большие отходы	Многорядный с шахматным расположением деталей  Для деталей небольших размеров круглой и шестигранной формы в крупносерийном и массовом производстве

(см. рис. 3, *а*) последовательность расчета норм расхода материалов следующая.

Шаг подачи

$$t = D + a_1. \qquad (3)$$

Расчетная ширина полосы

$$b_р = D + 2a. \qquad (4)$$

Номинальную ширину полосы $b_н$ вычисляют по формулам (1) и (2) в зависимости от выбранной конструкции штампа.

1. Поперечный раскрой листа. Число полос, получаемых из листа, $n_п = L/b_н$. Число деталей, получаемых из полосы, $n_д = B/t$. Здесь L — длина листа, B — его ширина.

Число деталей, получаемых из листа, $N = n_п n_д$. Коэффициент использования листа при поперечном раскрое

$$\eta = \frac{NF_д}{BL}, \qquad (5)$$

где $F_д$ — площадь детали;

$F_д = 0{,}785D^2$.

2. Продольный раскрой листа. Число полос, получаемых из листа, $n'_п = B/b_н$.

Число деталей, получаемых из полосы, $n'_д = L/t$.

Число деталей, получаемых из листа, $N' = n'_п n'_д$.

Коэффициент использования материала при продольном раскрое

$$\eta' = \frac{N'F_д}{BL},$$

где $F_д$ — площадь детали.

Для получения максимального коэффициента использования материала расчеты целесообразно проводить для нескольких размеров листов. Например: 710 × 1420 мм, 1000 × × 2000 мм, 1420 × 2840 мм. Выбирают размер листа и вариант раскроя его на полосы, обеспечивающие максимальный коэффициент η_{max} использования материала.

Норму расхода материала (кг на 1000 дет.) рассчитывают по формуле

$$H_м = \frac{F_д s\rho}{1000\eta_{max}}, \qquad (6)$$

где s — толщина материала; ρ — его плотность.

При однорядной вырубке из ленты последовательность расчета норм расхода материала следующая.

По формулам (3) и (4) находят шаг подачи t, ширину ленты $b_р$, номинальную ширину ленты $b_н$. При поступлении ленты со стороны применяют ленты шириной не меньше номинальной.

Коэффициент использования материала

$$\eta = \frac{F_д}{tb_н}.$$

Норма расхода материала

$$H_м = \frac{F_д s\rho}{1000\eta} k, \qquad (7)$$

где k — коэффициент, учитывающий концевые отходы ленты; $k = 1{,}05 \div 1{,}1$.

При параллельном расположении деталей на полосе (ленте) (см. рис. 3, *б*) шаг подачи $t = D + a_1$.

Расчетная ширина полосы при двухрядном раскрое $b_р = 2D + 2a + a_1$.

Расчетная ширина полосы (ленты) при n-рядном раскрое $b_р = nD + 2a + (n - 1)\,a_1$, где n — число рядов.

Число деталей из полосы:

при поперечном раскрое листа

$$n_д = \frac{B}{t} n; \qquad (8)$$

при продольном раскрое листа

$$n'_д = \frac{L}{t} n. \qquad (9)$$

При шахматном расположении деталей на полосе (ленте) (см. рис. 3, *в*, *г*) шаг подачи $t = D + a_1$.

Расчетная ширина полосы при двухрядном раскрое $b_р = (D + 2a) + (D + a_1)\cos\alpha$.

Расчетная ширина полосы при n-рядном раскрое

$$b_р = (D + 2a) + (n - 1)(D + a_1)\cos\alpha.$$

Число заготовок из полосы для нечетных рядов подсчитывают по формулам (8) и (9); для четных рядов полученный результат уменьшают на единицу, если остаток по длине полосы

$$l_{ост} \leqslant D/2 + a_1.$$

Расчет других параметров и норм расхода материала при раскрое листа на полосы и вырубке из полосы ведут в последовательности и по формулам, указанным для однорядного раскроя.

При двухрядной штамповке с поворотом полосы на 180° от раскроя листа на полосы возможен остаток, из которого вырубают еще один ряд заготовок. Тогда к числу деталей, получаемых из листа, прибавляется число деталей из остатка, которое определяют по формуле

$$n^*_{ост} = \frac{B - l_д}{t} + 1,$$

где $l_д = l_в + l_н$ (см. рис. 4).

При n-рядной штамповке из ленты коэффициент использования материала

$$\eta = \frac{F_д n}{tb_н}, \qquad (10)$$

где n — число рядов.

Норму расхода материала определяют по формуле (7).

При вырубке деталей непосредственно из листа число рядов

$$n_п = \frac{B - (D + a_1 + 2a)}{t'} + 1, \qquad (11)$$

где $t' = (D + a_1)\cos\alpha$.

Число деталей в нечетных рядах $n_{д1} = L/t$.

В четных рядах $n_{д2}$ уменьшают на единицу, если остаток по длине полосы

$$l_{ост} \leqslant D/2 + a_1.$$

Число деталей из листа:

при четном числе рядов

$$N = \frac{n_п}{2}(n_{д1} + n_{д2});$$

при нечетном числе рядов

$$N = \left(\frac{n_п - 1}{2} + 1\right) n_{д1} + \frac{n_п - 1}{2} n_{д2}.$$

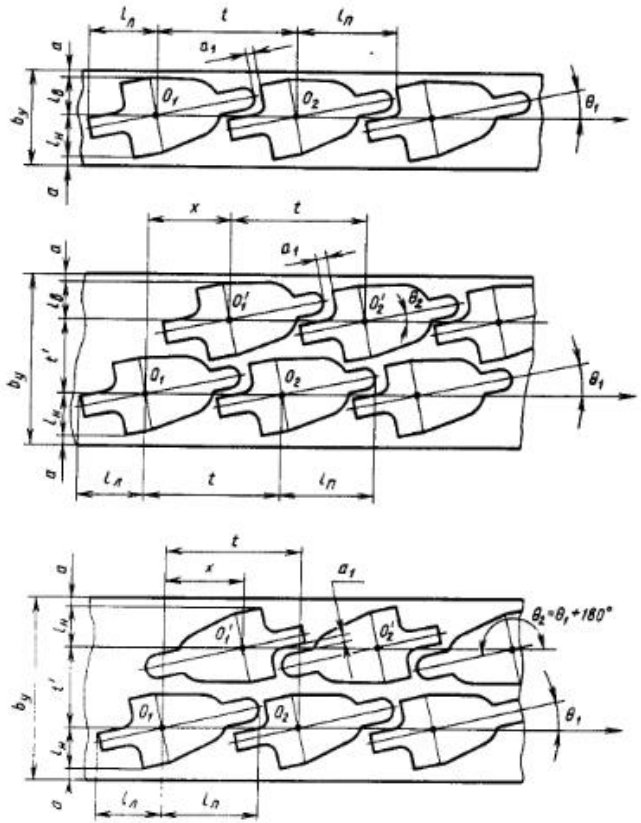


Рис. 4. Схемы расположения деталей произвольной конфигурации:
а — однорядная; *б* — двухрядная при $\theta_2 = \theta_1$; *в* — двухрядная при $\theta_2 = \theta_1 + 180°$

Коэффициент использования материала и нормы его расхода определяют по формулам (5) и (6).

При вырубке деталей из рулона число рядов определяют по формуле (11). Коэффициент использования материала

$$\eta = \frac{F_д n_п}{tB}, \qquad (12)$$

где $n_п$ — число рядов; B — ширина рулона.

Норму расхода материала вычисляют по формуле (7).

Расчет норм расхода материала при вырубке деталей (заготовок) произвольной конфигурации. *При раскрое листа на полосы и вырубке деталей из полосы* последовательность расчета норм расхода материалов следующая.

1. При однорядном раскрое (рис. 4, *а*) шаг подачи t равен расстоянию между центрами деталей O_1O_2.

Расчетная ширина полосы $b_р = l_н + l_в + 2a$.

Номинальную ширину полосы рассчитывают по формулам (1) и (2).

Число деталей, получаемых из полосы:

для поперечного раскроя

$$n_д = \frac{L(l_л + l_п)}{t} + 1; \qquad (13)$$

для продольного раскроя

$$n'_д = \frac{B - (l_л + l_п)}{t} + 1. \qquad (14)$$

В этих формулах $l_л$ и $l_н$ — расстояния от полюса заготовки соответственно до левой и правой опорной прямой; $l_в$ и $l_н$ — расстояния от полюса заготовки соответственно до верхней и нижней опорной прямой.

2. При двухрядном раскрое заготовки в первом и втором рядах имеют одинаковый угол наклона к направлению подачи: $\theta_1 = \theta_2$ (рис. 4, *б*).

Расчетная ширина полосы $b_р = l_н + l_в + t' + 2a$.

Число заготовок в первом ряду определяют по формулам (13) и (14).

Число деталей во втором ряду:

при поперечном раскрое

$$n_{д2} = \frac{L - x - (l_л + l_п)}{t} + 1; \qquad (15)$$

при продольном раскрое

$$n'_{д2} = \frac{B - x - (l_л + l_п)}{t} + 1, \qquad (16)$$

где x — смещение центра детали второго ряда относительно детали первого ряда по направлению подачи.

Число деталей, получаемых из полосы,

$$n_д = n_{д1} + n_{д2}. \qquad (17)$$

Детали во втором ряду повернуты относительно деталей первого ряда на 180°: $\theta_2 = \theta_1 + 180°$ (рис. 4, *в*).

Расчетная ширина полосы $b_р = 2l_н + t' + 2a$.

Число деталей в первом ряду определяют по формулам (13) и (14).

Число деталей во втором ряду:

при поперечном раскрое

$$n_{д2} = \frac{L - x - 2l_л}{t} + 1; \qquad (18)$$

при продольном раскрое

$$n'_{д2} = \frac{B - x - 2l_л}{t} + 1. \qquad (19)$$

Число деталей, получаемых из полосы,

$$n_д = n_{д1} + n_{д2}; \quad n'_д = n'_{д1} + n'_{д2}.$$

3. При n-рядном раскрое последовательность расчета следующая.

а) При $\theta_1 = \theta_2 = \ldots = \theta_n$ расчетная ширина полосы

$$b_р = l_н + l_в + (n-1)\,t' + 2a.$$

Число деталей в нечетных рядах подсчитывают по формулам (13) и (14), в четных рядах — по (15) и (16); число деталей из полосы определяют по формуле (17).

б) При $\theta_{2,\,4,\,6} = \theta_{1,\,3,\,5} + 180°$ расчетная ширина полосы

$$b_р = 2l_н + (n-1)\,t' + 2a.$$

Число заготовок в нечетных рядах определяют по формулам (13) и (14), в четных рядах — по (18) и (19); число заготовок из полосы вычисляют по формуле (17).

Расчет числа деталей, получаемых из листа, коэффициента использования материала, выбор размеров листа и варианта его раскроя на полосы, обеспечивающего минимальный коэффициент использования материала и норму его расхода, выполняют по тем же формулам, что и для круглых деталей.

При вырубке деталей из ленты определение шага подачи, расчетной ширины ленты проводят по тем же формулам, что и при штамповке из полосы.

Коэффициент использования материала определяют по формуле (10); норму расхода материала — по формуле (7).

При вырубке деталей непосредственно из листа число рядов

$$n_п = \frac{L - (l_н + l_в) - a_1 - 2a}{t'} + 1. \qquad (20)$$

Число деталей в нечетных рядах определяют по формуле (14), в четных рядах — по (16).

Расчет числа деталей из листа, коэффициента использования материала, нормы его расхода проводят по формулам, приведенным для круглых деталей.

При вырубке деталей из рулона число рядов определяют по формуле (20), коэффициент использования материала по (12), норму расхода материала по (7).

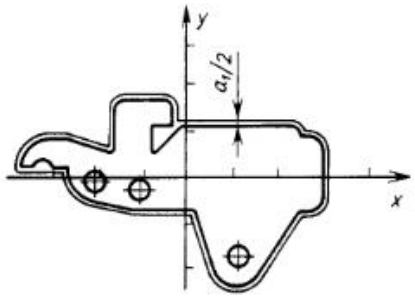


Рис. 5. Построение эквидистантной фигуры

Выбор рационального раскроя материала и варианта технологии изготовления деталей (заготовок) с помощью ЭВМ. Рациональную схему размещения деталей произвольной конфигурации обеспечивают математические методы с использованием ЭВМ и, в частности, метод плотного размещения деталей на материале с использованием годографа функции плотного размещения.

При выборе плотного размещения деталей с использованием годографа функции плотного размещения прежде всего проводится обработка геометрической информации о наружном контуре детали (заготовки). Сначала задают полюс и оси координат детали. Полюс выбирают в центре симметрии на оси или в точке пересечения осей симметрии (если они имеются). Контур детали упрощается путем исключения впадин, в которые не могут вписываться ее выступающие части.

Данные о геометрической форме деталей задают таблицей координат точек

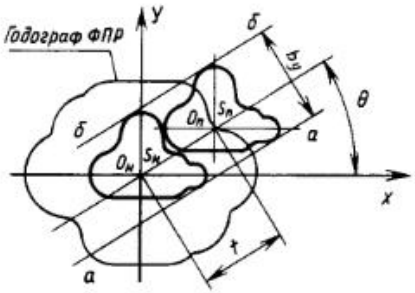


Рис. 6. Построение годографа функции плотного размещения

контура относительно выбранного полюса.

Для обеспечения взаимного непересечения деталей наружный контур детали увеличивают по периметру на размер, равный половине межконтурной перемычки a_1, т. е. вокруг детали проводят ее контурную линию, удаленную на $a_1/2$ (ведется построение эквидистантной фигуры) (рис. 5). В последующих расчетах под заготовкой будет подразумеваться эквидистантная фигура.

По программе на ЭВМ проводится выбор рациональной схемы плотного размещения деталей на материале. Расчет производится с использованием годографа функции плотного размещения. Годограф представляет собой траекторию полюса подвижной фигуры $S_п$ при ее плотном движении вокруг неподвижной $S_н$, т. е. фигуры касаются друг друга, но не пересекаются (рис. 6). Далее последовательно через определенный угол наклона линии $O_н O_п$ к оси координат Ox, например, через каждый градус, находят расстояние между полюсами подвижной и неподвижной заготовки ($O_п O_п$ — шаг подачи), а также условную ширину полосы b_y, которая равна расстоянию между касательными $а—а$ и $б—б$, параллельными линии $O_н O_п$, проведенными к наиболее удаленным точкам детали.

Расчетную ширину полосы определяют по формуле

$$b_р = b_y + 2a - a_1.$$

Для расчета коэффициента использования материала и нормы расхода материала используют формулы, приведенные выше. Принимают угол наклона θ, при котором обеспечивается максимальный коэффициент использования материала η_{max}.

Наибольший эффект по снижению затрат на производство деталей получается при сравнении нескольких вариантов производства. Из табл. 5 видно, что только при штамповке в один ряд, два ряда и многорядной вырубке деталей из листа, рулона в классификацию включено 14 вариантов производства, для которых ведется выбор рациональных схем раскроя и расчет норм расхода материала.

5. Классификация вариантов производства плоских деталей с отверстиями, вырезками, надрезками при комбинированной штамповке

№ варианта	Вид исходного материала	Вид материала, поступающего на штамповку	Тип штампа	Число деталей, штампуемых за один рабочий ход	Автоматизация операции
		Однорядный раскрой			
1	Лист	Полоса	Совм	1	Нет
2			Посл		
3			Совм		Да
4	Лента	Лента			
5			Посл		
		Двухрядный раскрой			
6 *	Лист	Полоса	Совм		Нет
7					Да
8					Нет
9				2	Да
10	Лента	Лента		1	
11					
12			Посл	2	
		n-рядный раскрой			
13	Лист	Лист	Совм	1	Да
14	Рулон	Рулон			
		Трехрядный раскрой			
15	Лист	Полоса	Совм	3	Нет
16					Да
17	Лента	Лента	Посл		
18					
		Четырехрядный раскрой			
19	Лист	Полоса	Совм	4	Нет
20					Да
21	Лента	Лента	Посл		
22					
		Пятирядный раскрой			
23	Лист	Полоса	Совм	5	Нет
24					Да
25	Лента	Лента	Посл		
26					

Примечание: совм — штамп совмещенного действия; посл — последовательного действия.

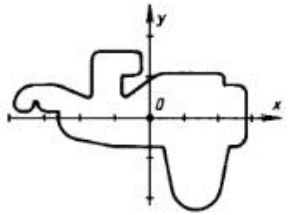


Рис. 7. Выбор полюса заготовки

Для плоских деталей (заготовок), изготовляемых за одну штамповаиную операцию, принят единый порядок расчета иа ЭВМ эффективности применения вариантов производства по годовым затратам $З_{год}$.

1. Расчет норм расхода материала по всем сравиваемым вариантам производства. При этом по каждому вариаиту производства выбирают схему плотиого размещения деталей, при которой обеспечивается η_{max} и наименьший расход материала.

2. Расчет технологической себестоимости 1 тыс. деталей по всем вариантам производства.

3. Расчет готовых затрат.

4. Нахождение действующего вариаита производства.

5. Расстановка вариантов в порядке возрастания годовых затрат.

6. Сравнение основных показателей вариаитов с расчетными показателями действующего варианта производства.

7. Вывод на печать осиовных техиико-экономических показателей.

8. Выбор рациоиального варианта производства с учетом имеющихся ограиичений.

Графоаналитический способ плотного размещения деталей. На предприятиях, где при выборе рациональных вариаитов раскроя материала для деталей произвольной конфигурации не применяют ЭВМ, целесообразно использовать графоаналитнческий способ их плотного размещения.

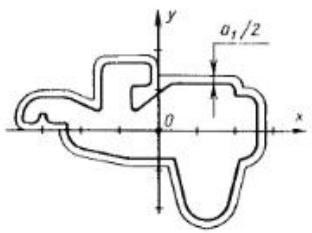


Рис. 8. Построение эквидистаитной фигуры

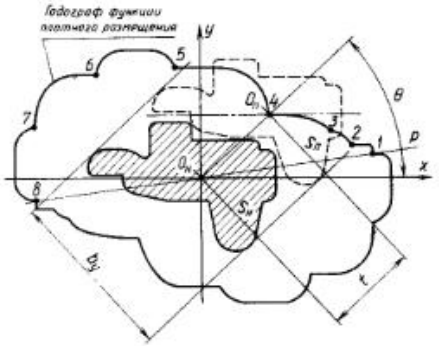


Рис. 9. Построение размещения заготовок по критическим точкам *1—7* годографа

Графоаналитический способ плотного размещения заготовок состоит из трех этапов.

Первый этап — выбор полюса детали (заготовки), построение эквидистантиой фигуры, построение годографа фуикции плотиого размещения, определение вариантов плотного размещения деталей (заготовок). Работа проводится в следующем порядке.

Заготовку вычерчивают иа миллиметровке, затем внутри заготовки на оси симметрии или на пересечении осей симметрии (если они имеются) выбирают ее полюс, через который проводятся оси координат так, чтобы одна из сторон заготовки была расположена параллельно оси Ox (рис. 7). Для учета межконтурной перемычки a_1 увеличивают размеры заготовки на половину этой перемычки путем построения вокруг ее контура эквидистаитной фигуры с исключением узких впадин контура заготовки, в которые не могут вписаться выступающие ее части (рис. 8). Фигуру дублируют на кальке. Чертеж заготовки, вычерченный на миллиметровке, называют «неподвижиой» заготовкой ($S_н$). Чертеж заготовки, переведенный на кальку, называют «подвижиой» заготовкой ($S_п$). Обе заготовки располагают на одиой оси так, чтобы оии ие иакладывались друг иа друга, а только касались. Далее перемещают

заготовку $S_п$ по контуру заготовки $S_н$, причем $S_п$ не поворачивается относительно системы координат xOy (рис. 9). При таком движении полюс $O_п$ заготовки $S_п$ описывает траекторию, которая называется годографом функции плотного размещения. Для определения варианта плотного размещения заготовок (см. рис. 9) на годографе рассматривают только его впадины. Так как годограф симметричен, то построение ведется не по всем впадинам, а только по точкам, лежащим выше прямой $P — P$, например *1—7* (см. рис. 9).

Сначала на годографе помещают полюс подвижной заготовки в точке *1*. Точку *1* соединяют с полюсом $O_н$ неподвижной заготовки. Параллельно полученной линии проводят прямые, касательные к заготовке: верхняя *а—а* и нижняя *б—б*, которые являются сторонами условной полосы при однорядном размещении заготовок. Далее определяют ширину полосы b_y, которая равна расстоянию между касательными *а—а* и *б—б*, и шаг подачи материала t, равный расстоянию между полюсами заготовок $S_н$ и $S_п$. После чего находят произведение шага подачи t и ширины полосы b_y. Последовательно выполняют такие же действия и по всем остальным впадинам годографа — точки *2—7*.

Второй этап — построение выпуклого многоугольника, описывающего эквидистантную фигуру, определение вариантов плотного размещения по «выпуклому» многоугольнику. Для определения одиорядного размещения заготовок по «выпуклому» многоугольнику вокруг эквидистанты описывают многоугольник и строят годограф (рис. 10), который для упрощения переносят с рис. 9. Далее одну из сторон многоугольника совмещают со стороной полосы. Например, сторону DC многоугольника $ABCDEK$ совмещают с краем полосы. На годографе определяют полюс «подвижной» заготовки $S_п$, для чего через полюс «неподвижиой» заготовки $S_н$ проводят прямую, параллельную стороие DC, до пересечения с годографом. Точка пересечения $O_п$ и будет полюсом размещеиия подвижной заготовки. После чего иаходят вторую сторону полосы,

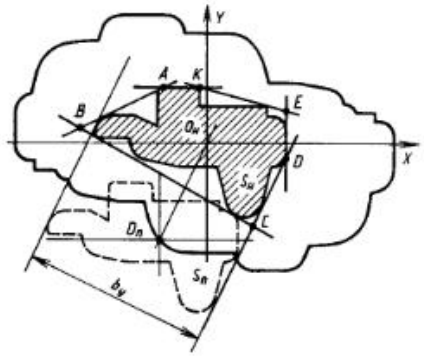


Рис. 10. Построение размещений заготовок по сторонам выпуклого многоугольника

параллельную первой и касательную к наиболее удаленной точке заготовки. Расстояние между ними и будет условной шириной полосы b_y, а расстояние между полюсами $O_н O_п$ — шагом подачи t. Затем определяют площадь прямоугольника, равную произведе-

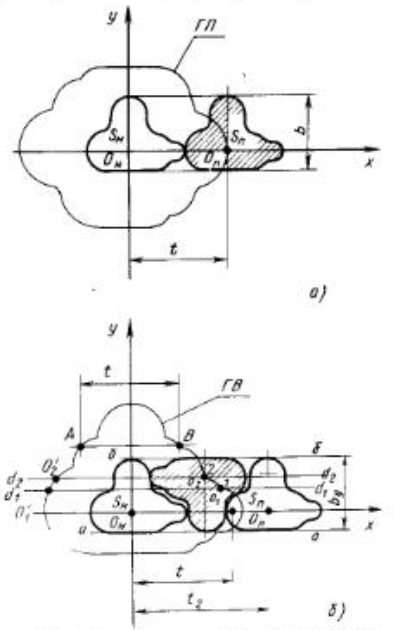


Рис. 11. Раздвижение деталей в ряду:
а — построение «прямого» годографа; *б* — построение «встречиого» годографв

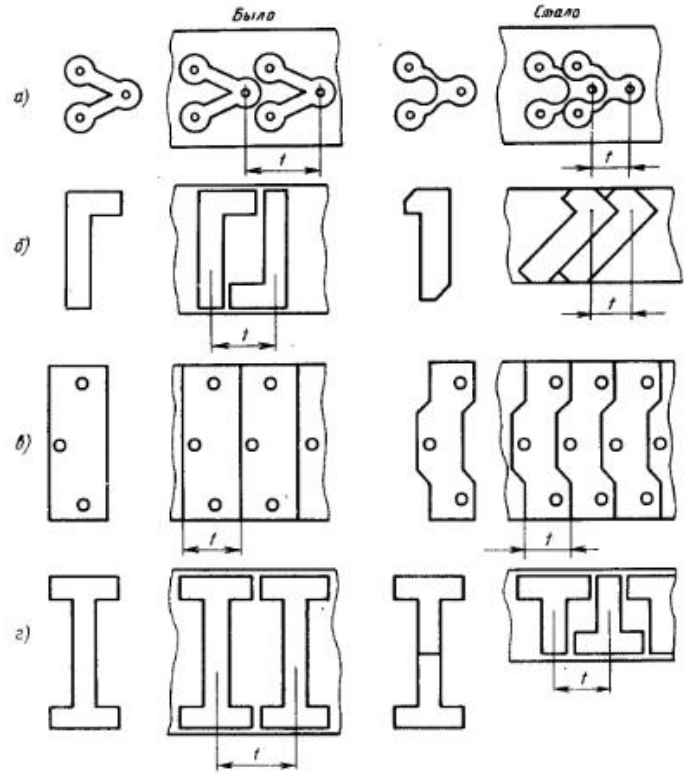


Рис. 12. Примеры выбора наружного контура деталей, при котором обеспечивается их работоспособность и наиболее плотное размещение на материале

нию шага подачи t на условную ширину полосы $b_у$. Каждую из сторон многоугольника совмещают с краем полосы, находят ширину условной полосы, шаг подачи и их произведение.

Третий этап — выбор наилучшей схемы плотного размещения заготовок и исходных данных для последующих расчетов. Площади прямоугольников, полученные при расчетах по первому и второму этапам, сравнивают. Выбирают схему размещения заготовки на материале, при которой площадь прямоугольника наименьшая. Расчет норм расхода материала выполняют по формулам, приведенным выше.

С помощью графоаналитического способа плотного размещения заготовок на материале можно также выбирать рациональные схемы размещения заготовок при штамповке их с поворотом полосы, когда $\theta_2 = \theta_1 + 180°$; при двухрядной штамповке, когда $\theta_1 = \theta_2$ и $\theta_2 = \theta_1 + 180°$.

При построении двухрядного размещения с поворотом заготовок во втором ряду на 180° наилучший вариант размещения возможен при раздвижении заготовок в первом ряду и расположении между ними заготовок второго ряда. Для упрощения принимают такой угол наклона оси заготовок первого ряда к направлению подачи, при котором одна из ее сторон параллельна стороне полосы (ленте), а заготовка, расположенная во втором ряду, наилучшим образом вписывается между заготовками первого ряда. Построение годографов ведется при прямом расположении заготовок — годограф «прямой» (ГП) (см. рис. 11, *а*) и при встречном их расположении — годограф «встречный» (ГВ) (рис. 11, *б*). На «прямом» годографе в точке пересечения годографа с осью x помещают подвижную заготовку. Расстояние $O_н O_п$ является шагом подачи. На «встречном» годографе отсекают отрезок AB, равный шагу подачи t между заготовками первого рода. Для нахождения плотного размещения заготовок во втором ряду на «встречном» годографе фиксируют только те критические точки, которые лежат ниже прямой AB, т. е. точки *1* и *2*. Через эти точки проводят прямые d_1 и d_2, которые отсекают на годографе отрезки, равные расстоянию между полюсами заготовок $S_н$ и $S_п$: для точки *1* $t_1 = O_1O_1'$, для точки *2* $t_2 = O_2O_2'$.

Таким образом, для определения полюса второй заготовки первого ряда по оси x откладывают расстояние, равное шагу t_2; при этом полюс заготовки второго ряда фиксируют в точке *2*. К заготовкам $S_н$ и $S_п$ проводят опорные прямые *а—а* и *б—б*, определяют расстояние $b_у$ между ними и рассчитывают произведение шага подачи t_2 на условную ширину полосы $b_у$. После чего заготовку помещают в точку *1* и проводят аналогичные построения и расчеты. Наилучшей является схема размещения заготовок, при которой произведение шага подачи на условную ширину полосы будет минимальным. Норму расхода материала определяют по формулам, приведенным выше.

Совершенствование конструкции штампуемых деталей с целью снижения расхода материала на их изготовление. Раскрой материала и его выбор зависят от конструкции штампуемой детали. Наибольшего эффекта в снижении расхода материала на изготовление деталей достигают, когда вопросами экономии материала занимаются не только технологи, но и конструкторы.

В этом случае уже на стадии проектирования можно подобрать наружный контур детали, обеспечивающий ее работоспособность и наиболее плотное размещение на материале при вырубке. Наибольшего коэффициента использования материала достигают, когда выступающие части детали вписываются во впадины другой (рис. 12, *а*). Значительную экономию можно получить изменением типа раскроя материала и срезом угла (рис. 12, *б*), а иногда и заменой контура детали без изменения расположения отверстий (рис. 12, *в*).

Значительно повышается коэффициент использования материала при применении сварных конструкций из деталей, имеющих простую форму (рис. 12, *г*), а также при использовании отходов при вырубке крупногабаритных деталей для последующей штамповки из них других заготовок.

Способствует экономии материала и вырубка без технологических перемычек (если это возможно), например, квадратных и шестигранных деталей, пластин трансформатора.

Глава 15 ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА С МЕСТНЫМ НАГРЕВОМ И В СОСТОЯНИИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Изготовление деталей из листа, тонкостенных труб и профилей целесообразно проводить с применением нагрева в тех случаях, когда деформирование заготовки вхолодную невозможно или оказывается слишком трудоемко.

Часто горячую штамповку рекомендуется проводить при дифференцированном нагреве заготовки. При этом части заготовки, через которые передаются деформирующие усилия, должны быть нагреты в меньшей степени, чем части, в которых необходимо получить наибольшие степени деформации.

При выборе температур деформирования можно руководствоваться диаграммой пластичности.

Зависимость временного сопротивления некоторых листовых металлов от температуры нагрева приведена на рис. 1.

На основании диаграммы для сплава ОТ4 можно сделать вывод о том, что максимум пластичности этого сплава находится в пределах температур 680—800 °С; прочность практически остается постоянной и невысокой в интервале температур 680—1000 °С.

Время нагрева титановых сплавов должно быть минимальным, чтобы не допустить образования альфированного слоя и ограничить рост зерна, ведущий к снижению пластичности.

Титановые сплавы рекомендуется штамповать при температуре 500—700 °С; нагрев следует осуществлять с большой скоростью токами высокой частоты.

Алюминиевые сплавы рекомендуется штамповать при температуре 300—450 °С, стали — при 700—1000 °С, магниевые и молибденовые сплавы — 300—400 °С.

Элементы штампов, которые находятся в зоне температур, достигающих 900—1000 °С, следует изготовлять из жаростойких сплавов или порошковых материалов. Можно использовать жаропрочные сплавы типа ЭИ437Б, ЖС6К, ЭП200. При нагреве инструмента и заготовки до температуры 650—700 °С рекомендуют материалы 3Х2В8Ф, 4Х2В5ФМ, Р18Ф2К8М.

Для деформирования сплавов на основе алюминия и магния рабочие части штампов можно изготовлять из стали марок 5ХНМ, 4Х5В2ФС; при штамповке молибденовых сплавов — из твердых сплавов ВК6, ВК8, ВК10 или стали Р18. Штампы, изготовленные из рекомендуемых материалов, необходимо подвергать термической обработке в соответствии с ГОСТом; рабочие поверхности штампов следует полировать.

Перед штамповкой заготовку и рабочие поверхности инструмента необходимо смазывать. Для этого при горячей штамповке рекомендуется применять коллоидно-графитный препарат В-0 или В-1. Смазочный материал наносят пульверизатором, кистью или тампоном, после чего поверхность следует высушить. Происходит испарение летучих компонентов, а на заготовке и инструменте остается тонкий слой графита, служащий хорошей смазкой. После деформации смазочный материал удаляется с поверхности механическим путем (шлифовальной шкуркой и т. д.) или химической обработкой.

При штамповке с нагревом можно применять следующие виды оборудования:

гидравлические прессы вертикального типа, снабженные маркетными устройствами. При отсутствии маркетного устройства на столе пресса следует установить гидро- или пневмоцилиндр, от которого будет перемещаться упор-выталкиватель. В процессах, когда необходимо использовать прижим (при вытяжке), применяют прессы двойного действия;

при деформировании концов труб рекомендуются специальные гидравлические прессы (станки) горизонтального типа, например, СТ-1, СФКТ-30.

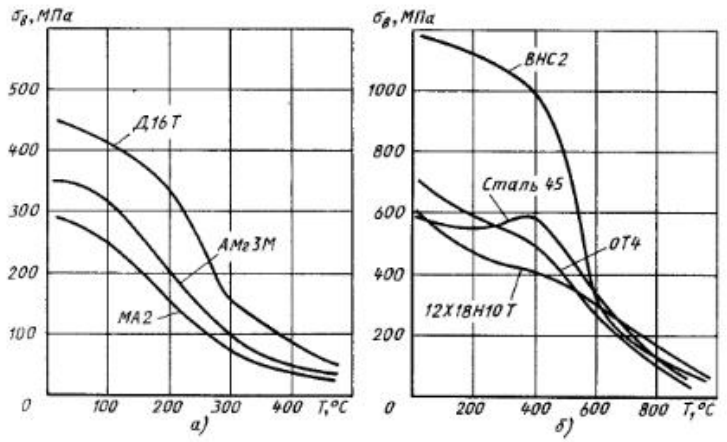


Рис. 1. График зависимости временного сопротивления от температуры испытаний: *а* — сплавы на основе алюминия; *б* — титановые сплавы и стали (10Х15НД27 по ГОСТ 5632—72)

Скорость перемещения траверсы у применяемого оборудования должна бесступенчато регулироваться в пределах 0—20 см/мин.

Нагрев рабочего инструмента штамповой оснастки рекомендуется осуществлять от индукторов токами высокой частоты ламповых или машинных генераторов, встроенными ТЭНами или нихромовыми спиралями.

Обжим. Предельные возможности при обжиме трубчатой заготовки характеризуются коэффициентом обжима.

В зоне деформации металла необходимо создавать перепад температуры, который устанавливается автоматически в зависимости от интенсивности нагрева и охлаждения определенных зон заготовки и от скорости деформирования. Создание оптимального перепада температур по очагу деформации удается нагревом заготовки трубы непосредственно в матрице и охлаждением ее в зоне передачи усилия.

На рис. 2 показана схема штампа для обжима труб с нагревом. При обжиме труб с толщиной стенки 1—2 мм из алюминиевых и магниевых сплавов рекомендуется скорость деформирования 6—10 см/мин, при этом устанавливается перепад температур по очагу деформации 100—150 °С; для титановых сплавов при скорости деформирования 4—6 см/мин без охлаждения зоны передачи усилия устанавливается перепад температур 200—300 °С.

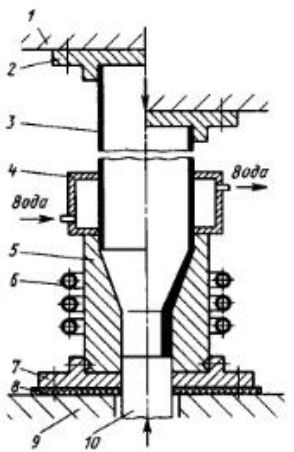


Рис. 2. Схема штампа для обжима труб с нагревом:

1 — траверса пресса; *2* — направляющая трубы; *3* — трубчатая заготовка; *4* — охладитель; *5* — матрица; *6* — индуктор ТВЧ; *7* — опора; *8* — теплоизолятор; *9* — стол пресса; *10* — выталкиватель

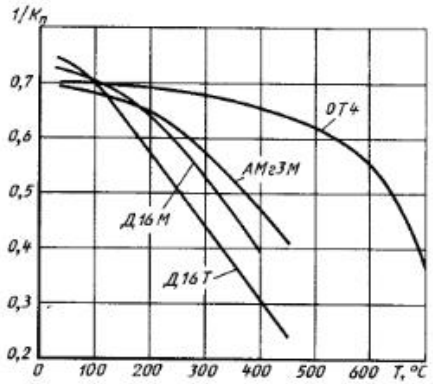


Рис. 3. Зависимость предельного коэффициента обжима труб от температуры деформирования при дифференцированном нагреве в конической матрице (α = 12°)

На рис. 3 представлены значения предельных коэффициентов обжима при различных температурах нагрева матрицы.

При обжиме могут образоваться дефекты в виде кольцевых складок в зоне передачи усилия (перед матрицей) или в виде продольных складок на кромке трубы в зоне деформации. Кольцевые

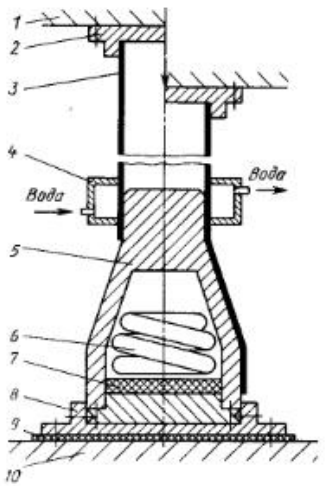


Рис. 4. Схема штампа для раздачи труб с нагревом:

1 — траверса пресса; *2* — направляющая; *3* — трубчатая заготовка; *4* — охладитель; *5* — пуансон; *6* — электронагреватель; *7*, *9* — теплоизоляция; *8* — опора; *10* — стол пресса

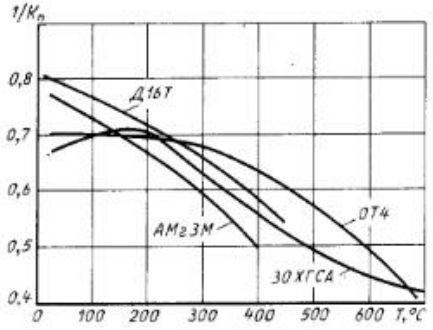


Рис. 5. Зависимость предельного коэффициента раздачи труб от температуры деформации при дифференцированном нагреве

складки образуются, если напряжение здесь превысит временное сопротивление, а продольные складки наблюдаются, если отношение толщины трубы к диаметру меньше 0,015.

Если обжиму подвергается заготовка, сваренная продольным швом, влияние шва можно компенсировать созданием перепада температур в пределах 50—150 °С в окружном направлении. В этом случае осуществляется обжим с дифференцированным нагревом в продольном и поперечном направлениях. Обжим может быть осуществлен в матрицах с различной формой рабочих поверхностей (конус, сфера и т. д.).

Толщина стенки обжатой части трубы изменяется приблизительно так же, как при обжиме без нагрева.

При обжиме с дифференцированным нагревом может быть осуществлен набор материала в обжатой части трубы под нарезание резьбы, сварку и т. д.

Раздача трубчатых заготовок является распространенной технологической операцией. Нагрев заготовки в зоне деформации весьма расширяет возможности процесса. Наиболее рационально заготовку нагревать от пуансона (рис. 4). При этом можно изготовлять сложные детали, которые в обычных условиях получают многооперационной штамповкой и сваркой. Оптимальные углы конусности пуансонов 12—25°. При углах выше 50° труба начинает выворачиваться наружу.

Формоизменение заготовки ограничивается разрывом металла на ее кромке. Предельные коэффициенты раздачи $K_п$ зависят от температуры нагрева пуансона (рис. 5).

Скорость перемещения траверсы при раздаче труб на алюминиевой основе 8—10 см/мин; для титановых сплавов и сталей 3—6 см/мин.

Если для раздачи используются заготовки с продольным сварным швом, то в зоне шва необходимо понизить температуру на 50—100 °С. С этой целью в пуансоне вдоль образующей, где будет расположен шов, необходимо просверлить отверстие, через которое во время деформирования заготовки будет продуваться воздух.

Толщина стенки вблизи кромки заготовки уменьшается приблизительно так же, как при раздаче без нагрева.

Осадка труб необходима для создания местного утолщения под сварку, нарезания резьбы и т. д. На тонкостенных трубах утолщение стенки без нагрева практически невозможно. Свободная осадка с нагревом тоже неприемлема.

Хорошие результаты можно получить при осадке в матрице с дифференцированным нагревом (рис. 6).

Возможности процесса осадки характеризуются отношением толщины s стенки после осадки к исходной толщине s (0). Предельное значение этого отношения зависит от температуры нагрева матрицы (рис. 7).

Длина утолщенной части трубы определяется конструкцией (высотой) матрицы, а длину заготовки, необходимую для образования утолщения, определяют из условия постоянства объема металла:

$$l = \frac{V_0}{\pi d_{ср} s\,(0)},$$

где V_0 — объем утолщенной части трубы; $\pi d_{ср} s$ (0) — площадь сечения исходной трубы.

Значения скоростей инструмента при оптимальных температурах следующие: для алюминиевых и магниевых сплавов 8—12 см/мин; для титановых сплавов и сталей 2—6 см/мин. Осадку труб из титановых сплавов можно осуществлять без применения

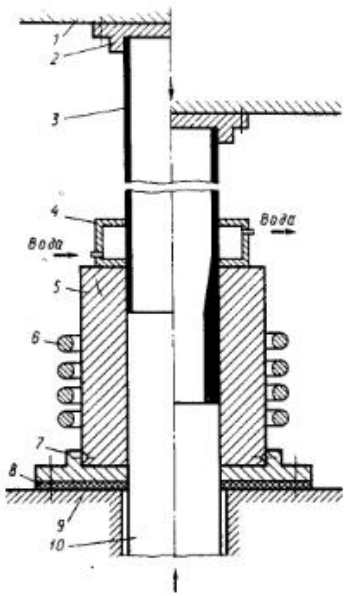


Рис. 6. Схема штампа для осадки труб с нагревом:

1 — траверса пресса; *2* — направляющая; *3* — трубчатая заготовка; *4* — охладитель; *5* — матрица; *6* — индуктор ТВЧ; *7* — опора; *8* — теплоизоляция; *9* — стол пресса; *10* — упор-выталкиватель

специального охладителя в зоне передачи усилия.

Осадка тонкостенных труб с наружным набором материала требует применения сложной оснастки. Для получения наружных утолщений рекомендуется сначала осуществить набор материала внутрь трубы, после чего

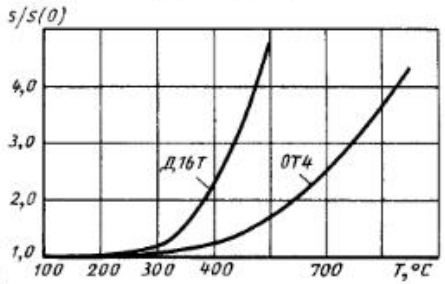


Рис. 7. Зависимость предельного коэффициента набора толщины от температуры деформации при дифференцированном нагреве матрицы

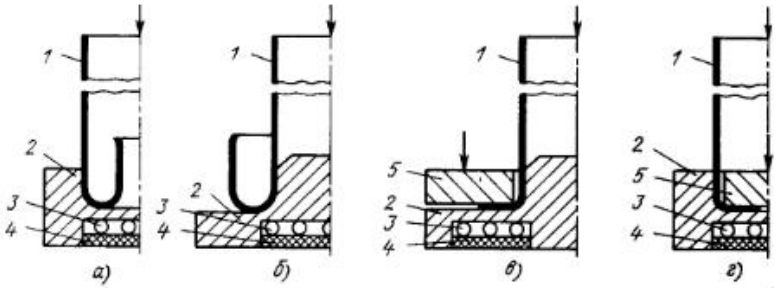


Рис. 8. Схема штамповки тонкостенных труб с нагревом:
а — выворачивание трубы внутрь; *б* — выворачивание трубы наружу; *в* — образование фланца на трубе; *г* — образование дна на трубе; *1* — заготовка; *2* — матрица (пуансон); *3* — нагреватель; *4* — теплоизолятор; *5* — прижим

набранный материал с помощью дорна перемещают (раздают) наружу.

Ограничивающим фактором при осадке является потеря устойчивости трубы в заходной части матрицы (образование кольцевых складок).

Выворачивание внутрь или наружу, образование дна или фланца на тонкостенных трубах (рис. 8) возможно только при нагреве заготовки непосредственно в очаге деформации. Эти процессы можно отнести к частным случаям обжима и раздачи.

При свободном выворачивании, когда радиус R кривизны равен (2—4) s (0), оснастка очень простая (см. рис. 8, *а*, *б*). С увеличением радиуса в матрице (пуансоне) необходимо выполнить соответствующую проточку и, кроме того, применять специальные прижимные вкладыши. С помощью этого процесса можно изготовлять двухстенные детали практически любой высоты.

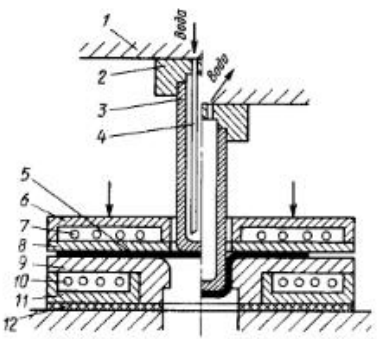


Рис. 9. Схема штампа для вытяжки листовой заготовки с дифференцированным нагревом:
1 — траверса пресса; *2* — пуансонодержатель; *3* — пуансон; *4* — трубка; *5* — заготовка; *6*, *11* — нагревательные коробки; *7*, *10* — электронагреватели; *8* — прижим; *9* — матрица; *12* — теплоизолятор

Раздачей трубной заготовки при местном нагреве получают фланцы заданной толщины, имеющие в плане различные контуры — круглые, шестигранные, квадратные и т. п. (см. рис. 8, *в*).

Образование дна обжимом трубчатой заготовки (рис. 8, *г*) позволяет заменить многопереходную вытяжку. Особенно это оправдано при получении высоких тонкостенных стаканов. Правда, в центре дна остается отверстие, которое можно закрыть сваркой или разводом утолщенной части дна.

Вытяжка с нагревом рекомендуется для металлов, обладающих малой пластичностью при вытяжке вхолодную, а также для изготовления деталей сложной формы; иногда для уменьшения числа переходов. Наиболее эффективные результаты наблюдаются при вытяжке с дифференцированным нагревом заготовки. Дифференцированный нагрев осуществляют за счет нагрева матрицы и прижима и охлаждения пуансона (рис. 9). В качестве нагревателей используются ТЭНы или нихромовые спирали, вмонтированные в матрицу и прижим.

На предельный коэффициент вытяжки, кроме оптимальных температур, значительное влияние оказывает давление прижима и скорость перемещения пуансона. Для алюминиевых и магниевых сплавов давление (0,3—0,6) 10^6 Па, а скорость 0,0013—0,0025 м/с; для сталей и титановых сплавов давление (2—4) 10^6 Па, скорость 0,0002—0,0005 м/с.

1. Предельные коэффициенты вытяжки цилиндрических стаканов из магниевых сплавов

Температура матрицы и прижима, °С	МА1			МА8		
	Толщина заготовки, мм			Толщина заготовки, мм		
	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
250	2,00	2,33	—	2,22	—	—
300	2,22	3,22	3,22	2,63	3,22	3,22
350	2,63	3,03	3,22	3,03	3,22	3,22
375	2,33	3,03	3,22	2,33	3,22	3,22
400	3,03	3,03	3,22	2,33	3,22	3,22

В табл. 1 даны предельные коэффициенты $K_п$ вытяжки цилиндрических стаканов из магниевых сплавов МА1 и МА8 за одну операцию. Пуансон охлаждался проточной водой из водопроводной сети.

При оптимально подобранных режимах можно вытянуть за один переход детали из алюминиевых сплавов с $K_п = 3{,}33 \div 3{,}2$; из титановых сплавов с $K_п = 3{,}33 \div 2{,}88$; из сталн с $K_п = 2{,}88 \div 2{,}5$.

Формоизменение при вытяжке с нагревом ограничивается, как и при обычной вытяжке, разрывом металла на участке контакта с тороидальной кромкой пуансона.

Формовка деталей в состоянии сверхпластичности. Сплавы на основе магния, цинка, алюминия находятся в состоянии сверхпластичности при температуре 200—500 °С, а сплавы на основе титана, хрома, никеля, железа при температуре 800—1100 °С.

Формовку при температуре 200—500 °С осуществляют на оборудовании, применяемом для формовки термопластов, а при температуре 800—1100 °С — на специальных установках, конструкция которых должна обеспечивать регулирование температуры в рабочей зоне штампа, прижим заготовки и герметичность полости под матрицей.

Нагрев заготовок до температуры 200—500 °С осуществляют в печах электросопротивления. Для получения более высоких температур применяют индукционный и контактный нагрев.

Формующей средой для сплавов на основе магния, алюминия, цинка может служить сжатый воздух; для титана — аргон или гелий. Рабочее давление до 6—10^5 МПа.

На рис. 10 показана схема штампа для формовки куполообразных деталей.

При разработке технологии формовки деталей из листа в состоянии сверхпластичности необходимо определить технологические параметры процесса: температуру нагрева штампа, давление газа и усилие прижима заготовки.

Температуру нагрева штампа выбирают с учетом максимального проявления сверхпластичности материалов

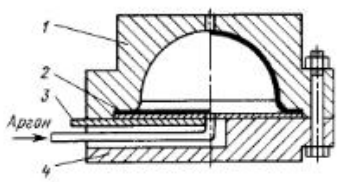


Рис. 10. Схема штампа для формовки полусфер из титановых сплавов в состоянии сверхпластичности:
1 — матрица; *2* — заготовка; *3* — задвижка; *4* — крышка

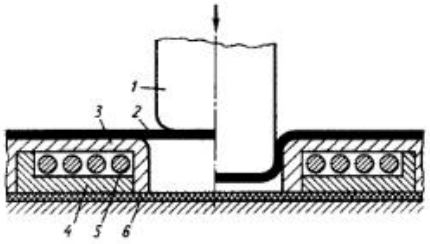


Рис. 11. Схема штампа для рельефной формовки листовых заготовок с нагревом:
1 — пуансон; *2* — заготовка; *3* — матрица; *4* — электронагревательная коробка; *5* — электронагреватель; *6* — теплоизоляция

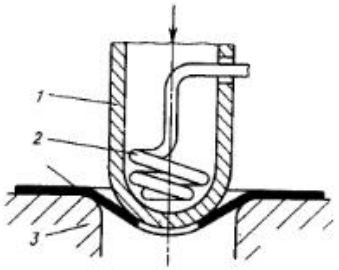


Рис. 12. Схема штампа для отбортовки отверстий в листовых заготовках:
1 — пуансон; *2* — нагреватель; *3* — заготовка; *4* — матрица

заготовки, которые находятся в интервале от $(0{,}4 \div 1{,}0)\, T_{пл}$.

Давление q газа, необходимое для формовки оболочки глубиной $h_в$ со сферической поверхностью радиуса R, определяют по формуле (38), гл. 8, а оболочки с плоским дном по формуле (40), гл. 8.

Прижим обеспечивает герметичность внутренней полости штампа в процессе формовки и удерживает фланец от смещения в матрицу. Усилие прижима

$$P_{пр} = k_з q F,$$

где q — давление газа; F — площадь поверхности прижима, расположенной внутри внешнего контура фланца; $k_з = 1{,}1 \div 1{,}15$ — коэффициент запаса.

Рельефную формовку (рис. 11) применяют для увеличения жесткости деталей и получения конструкционных углублений. Деформация при формовке происходит за счет местного растяжения материала в очаге деформаций. Подробно этот процесс изложен в гл. 8.

Отбортовку отверстий чаще всего применяют при изготовлении деталей с большим фланцем и для увеличения жесткости конструкции.

Чтобы получить борт на малопластичных материалах, необходимо проводить штамповку с нагревом. Нагревательный элемент размещают в пуансоне, в результате чего максимальная температура получается на кромке отверстия. Наиболее рекомендуемыми являются полусферические пуансоны (рис. 12).

Глава 16 ШТАМПОВКА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Листовые неметаллические материалы по своим свойствам и поведению в процессе деформирования в различных условиях существенно отличаются от металлов. Это объясняется как особенностью их структуры (неоднородность, анизотропность, слоистость и напряженность в исходном состоянии), так и специфическими особенностями разрушения этих материалов.

Знание особенностей строения и деформирования неметаллических материалов необходимо при изучении особенностей поведения этих материалов при их деформировании в условиях различных технологических процессов листовой штамповки (вырубки — пробивки, вытяжки, формовки, гибки и др.).

Неметаллические материалы по особенностям своего поведения под нагрузкой можно условно разделить на две группы.

1. Хрупкие листовые неметаллические материалы. К ним относятся слоистые и волокнистые пластики, анизотропные стеклопластики, слюда и материалы на ее основе, эбонит и др.

У таких материалов предел упругости в большой мере определяется условиями нагружения. Кривые растяжения таких материалов представляют собой прямую линию, деформация $\delta = 0{,}8 \div 1{,}2\ \%$. Четко выраженного предела упругости такие материалы не имеют.

Ряд термопластичных материалов (органическое стекло, листовой полистирол и др.) в условиях простого нагружения также претерпевают хрупкое разрушение при обычной или пониженной температуре, несмотря на то, что относительное удлинение в этом случае составляет 5—8 %.

Текстолиты и стеклотекстолиты подчиняются закону Гука при напряжениях, равных 20—40 % от разрушающих; гетинаксы при 60—80 % от этих же напряжений.

2. Пластичные (упруговязкие) листовые пластмассы; к ним относятся листовые термопластики, материалы на основе бумаги (фибра, картон, летероид) в условиях повышенной влажности, материалы на основе каучука и резины (электронит, паронит) и др. Кривые растяжения для таких материалов в условиях кратковременного простого нагружения имеют вначале линейный характер, который за пределом упругости переходит в нелинейный, заканчивающийся точкой разрушения. Остаточная деформация (удлинение δ) для таких материалов имеет значительную величину (рис. 1).

Следует иметь в виду, что хрупкость и пластичность штампуемого материала не являются физическими постоянными, так как поведение материала в процессе деформирования существенно зависит от условий деформирования, под которыми в теории обработки металлов давлением понимается механическая схема деформации, температура, величина и скорость деформации.

Термопластические материалы, а также материалы на их основе в зависимости от температуры могут находиться в трех состояниях: упругоэластичном, термоэластичном и термопластичном (рис. 2).

Механические характеристики таких материалов в значительной мере зависят от температуры (рис. 3). Графики (см. рис. 3) необходимы для выбора температурного режима в зависимости от заданных деформаций.

Для неметаллических материалов характерной является также зависимость механических характеристик от времени нагружения при различных видах нагружения, что обусловли-

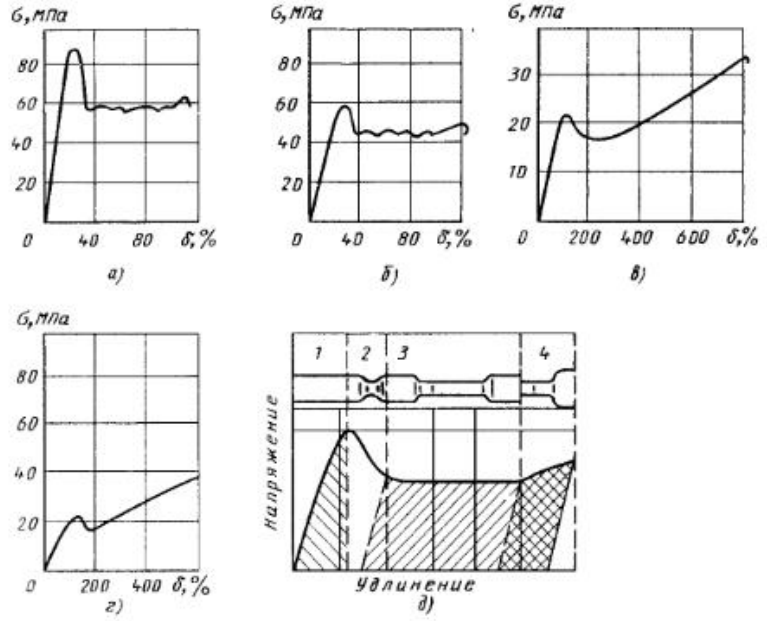


Рис. 1. Типовые диаграммы растяжения термопластиков:
а — акрилонитрилового сополимера; *б* — твердого поливинилхлорида; *в* — полиэтилена низкого давления; *г* — полиэтилена высокого давления; *д* — схема растяжения (*1* — до деформации; *2* — образование шейки; *3* — деформация; *4* — характер деформации перед разрывом)



Рис. 2. Агрегатные состояния термопластиков:
1 — органическое стекло; *2* — твердый поливинилхлорид; *3* — полиэтилен; *4* и *5* — сополимеры органического стекла; *а* — область затвердевания; *б* — область размягчения

вается релаксационными процессами, протекающими в процессе деформирования (рис. 4).

Наличие релаксационных процессов объясняется прежде всего отсутствием строгой упорядоченности в расположении элементарных объ-

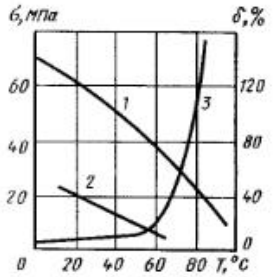


Рис. 3. Зависимость механических свойств винипласта от температуры:
1 — предел прочности при растяжении; *2* — предел ползучести; *3* — относительное удлинение при растяжении

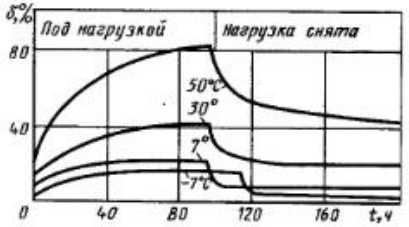


Рис. 4. Деформация гетинакса (прогиб при изгибе) под воздействием постоянного напряжения при различных температурах

емов, а следовательно, неравномерностью их в энергетическом отношении, а также наличием в них микроскопических дефектов в виде трещин и элементарных пор, развитие которых может происходить не только при критическом напряжении, но и при более низких значениях напряжений.

Подробные сведения об особенностях поведения неметаллических материалов синтетического и природного происхождения в различных условиях нагружения, а также технологические испытания приведены в специальной литературе.

2. РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Технологический процесс изготовления деталей из неметаллических материалов состоит из трех основных этапов:

1) подготовка исходной заготовки к штамповке — резка листов на полосы, их скрепление (для многослойной штамповки), смазывание, нагрев или увлажнение, шлифование шкуркой и т. д.;

2) штамповочные операции;

3) доделочные операции (нарезание резьб, нанесение цифр, рифлений надписей, шлифование деталей шкуркой, пропитка их электроизоляционными лаками и смолами и т. д.).

Разделительные операции листовой штамповки (отрезка, вырубка, пробивка, надрезка, разрезка, обрезка, зачистка и др.) применительно к неметаллическим материалам, в зависимости от требований, предъявляемых к качеству деталей, их точности и стоимости осуществляются с помощью следующих видов технологических процессов: без подогрева материала и инструмента; без подогрева материала, но с подогревом инструмента; с подогревом материала, но без подогрева инструмента; с подогревом материала и инструмента.

Выбор оптимального технологического процесса определяется материалом детали, ее толщиной, сложностью внутренних и наружных контуров и величиной допустимых дефектов на ее поверхности с точки зрения работоспособности в конкретных конструкциях и в заданных условиях эксплуатации.

Резка на ножницах. Листовые неметаллические материалы толщиной до 2,5 мм раскраиваются на ножницах.

Для обеспечения качественной резки листов из термореактивных и термопластичных пластмасс необходимо соблюдение следующих условий:

1) резку следует выполнять на ножницах с параллельными ножами, так как при резке на гильотинных ножницах в результате изгиба отрезаемой заготовки наклонным ножом на ее поверхности образуется сетка трещин («елочка»), что является недопустимым дефектом;

2) режущие кромки ножей должны иметь минимально возможный зазор, равный 0,01—0,03 мм и равномерный по длине реза; глубина опускания подвижного ножа не более 0,3—0,5 мм;

3) наиболее рациональной геометрией режущих кромок подвижного ножа является следующая: задний угол 8—10°, передний 3—5°;

4) резку листов на полосы следует производить при надежном прижиме материала. Для этого ножницы с параллельными ножами должны быть оснащены регулируемым прижимным устройством.

При соблюдении указанных условий резка слоистых и волокнистых пластиков, а также винипласта, целлулоида и полиэтилена возможна в холодном состоянии при толщине материала до 2—2,5 мм, а органического стекла до 1,5 мм. При резке материалов большей толщины, а также в тех случаях, когда к качеству поверхности разделения предъявляются повышенные требования, применяют подогрев материала до необходимой температуры.

1. Влияние давления истечения струи и состава рабочей жидкости на скорость подачи обрабатываемого материала относительно струи

Обрабатываемый материал	Рабочая жидкость	Скорость подачи материала, м/мин, при давлении истечения струи, МПа			
		100	200	300	400
Винипласт ВН	Вода	0,20	1,97	7,88	19,4
	ОАГ-ТМ	0,23	2,36	9,61	23,0
	ПАА	0,24	2,46	10,16	24,4
	ПОЭ	0,25	2,51	10,40	25,6
Гетинакс В	Вода	0,153	1,50	5,74	14,87
	ОАГ-ТМ	0,18	1,83	7,06	18,58
	ПАА	0,186	1,87	7,29	19,44
	ПОЭ	0,190	1,90	7,46	20,01
Стеклотекстолит КАСТ-В	Вода	0,10	1,02	3,90	10,1
	ОАГ-ТМ	0,12	1,25	4,87	12,7
	ПАА	0,125	1,26	5,03	13,2
	ПОЭ	0,13	1,27	5,12	13,6

Примечание. ОАГ-ТМ — водный раствор олигомера на основе оксиалкиленгликолевых эфиров таилового масла с молекулярной массой 800 при концентрации раствора 0,05 %; ПАА — водный раствор олигомера на основе полиакриламида с молекулярной массой $2 \cdot 10^6$ при концентрации раствора 0,03 %; ПОЭ — водный раствор олигомера полиоксиэтилена с молекулярной массой $4 \cdot 10^6$ при концентрации раствора 0,11 %.

При резке фольгнрованных пластиков фольга должна быть обращена к неподвижному ножу.

Картон, бумагу, текстовинит, электровинит, электронит, паронит, клингерит, ферронит и ряд других материалов на основе асбеста и каучука раскраивают как на ножницах с параллельными ножами, так и на специальных гильотинных ножницах-перщерах с хорошо заточениями и отрегулированными ножами.

Раскрой резины и ряда волокнистых материалов — фетра, войлока, эскапона и фибры — также выполняют на гильотинных ножницах.

Резку на полосы электротехнического картона, прессшпана, различных лакотканей, фибры толщиной до 2 мм производят на дисковых ножницах с зазором между ножами, близким к нулю, с перекрытием ножей не более 1—1,5 мм.

Резку листов на полосы и заготовки с помощью фрез и абразивных кругов, как правило, производят при раскрое толстолистовых материалов толщиной свыше 2,5 мм.

Гидравлическая резка листовых пластиков. Гидравлическую резку листовых полимерных материалов осуществляют тонкой струей жидкости, подаваемой со скоростью, превышающей скорость звука.

Наиболее эффективным способом увеличения режущей способности струи является введение в рабочую жидкость растворимых полимеров, что приводит к появлению в растворе крупных надмолекулярных образований — ассоциатов, которые в зависимости от скорости истечения жидкости

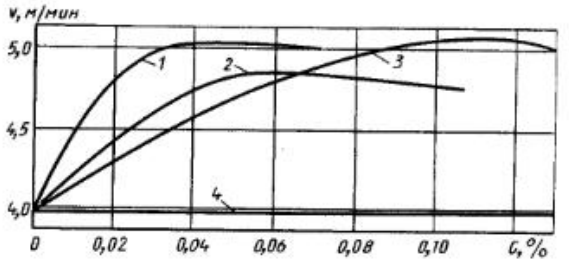


Рис. 5. Зависимость скорости подачи обрабатываемого материала относительно струи от концентрации раствора полимера при резке:
1 — раствора ПАА; *2* — ОАГ-ТМ; *3* — ПОЭ; *4* — чистой воды

ведут себя либо как капли обычной жидкости, способные обтекать преграду и принимать ее профиль, либо как достаточно жесткие частицы, способные без обтекания, а следовательно, более интенсивно разрушать материал в зоне резки, улучшая тем самым режущие свойства струи.

Вид рабочей жидкости оказывает влияние на производительность процесса гидравлической резки (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что производительность процесса гидравлической резки по сравнению с производительностью при обработке чистой водой в первом случае (ОАГ-ТМ) выше на 17—27 %, во втором (ПАА) — на 22—30,5 и в третьем (ПОЭ) — на 25—30 %.

Производительность процесса гидравлической резки с увеличением концентрации раствора возрастает (рис. 5), максимальная производительность имеет место для ПАА при концентрации раствора 0,03 %, для ОАГ-ТМ при 0,05 % и для ПОЭ при 0,11 %.

Растворимые полимеры образуют в рабочей жидкости вязко-упругую структуру, которая дает возможность разрезать более толстые материалы и обрабатывать детали, конфигурация которых не позволяет подвести обрабатываемую поверхность непосредственно к соплу установки.

Использование растворов полимеров в качестве рабочей жидкости при резке листовых пластиков способствует повышению (на 35—40 %) производительности процесса обработки и срока службы сопла, уменьшению ширины линии разреза и отходов материала, расширению технологических возможностей процесса гидравлической резки.

Вырубка деталей. Всевозможные детали и прокладки различной конфигурации вырубают из прокладочных неметаллических материалов — бумаги, картона, асбеста, а также из тонколистовой фибры, текстолита и гетинакса.

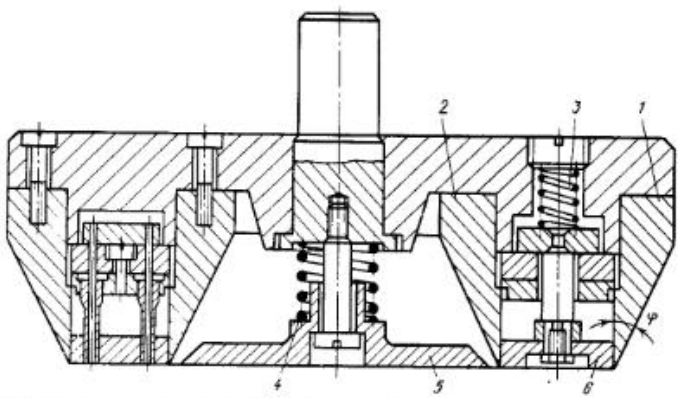


Рис. 6. Ножевой штамп для вырубки (просечки):
1, 2 — ножи (пуансоны); *3, 4* — пружины; *5, 6* — выталкиватели (пружины)

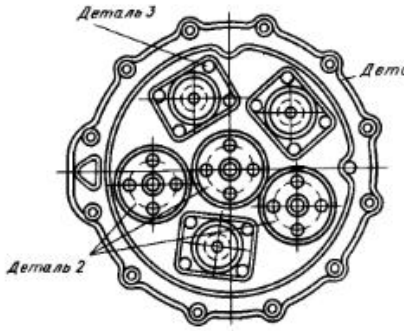


Рис. 7. Ленточно-ножевой штамп

Вырубку деталей простой конфигурации обычно производят ножевыми штампами-просечками обычной или упрощенной конструкции (рис. 6). Угол заострения ножей φ для мягких материалов (бумага, картон, прессшпан, кожа, фетр, резина, ткани) составляет 15—20°, для фибры, текстолита, гетинакса 30—35°.

Для деталей и прокладок сложной конфигурации применяют ленточно-ножевые штампы, у которых режущее полотно сделано из ленточной стали, изогнутой по форме вырубаемой детали (рис. 7). При вырубке бумажных

2. Сопротивление сдвигу неметаллических материалов при вырубке в штампах

Материал	$\sigma_{сд}$, МПа	Материал	$\sigma_{сд}$, МПа
Фибра:		Целлулоид	50—60
обыкновенная	120	Органическое стекло	70—90
твердая	170	Гетинакс	80—120
Бумага:		Текстолит	90—120
обыкновенная	20—30	Стеклотекстолит	120—150
твердая	25—40	Прессшпан	70—80
Картон	30—60	Миканит	100
Эбонит	30	Резина	6—10
Кожа	40—50	Полиэтилен	30—40
		Винипласт	60—80

3. Сопротивление сдвигу неметаллических материалов при просечке ножевыми штампами

Материал	$\sigma_{сд}$, МПа	Материал	$\sigma_{сд}$, МПа
Бумага (0,25 мм), число листов:		Кожа дубленая	50
1	160	Целлулоид	50
5	45	Березовая фанера	20
10	23	Сосновая фанера	10
20	14	Текстолит	90
Картон	30	Гетинакс	120
Прессшпан	70	Слюда (0,5 мм)	80
Клингерит	40	Слюда (2 мм)	50
Кожа мягкая	7	Резина	8

Примечание. При затуплении режущих кромок сопротивление сдвигу превышает указанные значения.

и других тонколистовых прокладок применяют штамповку пачками (до 50 листов) двумя способами: штамповку насквозь на фибровой, полиуретановой или деревянной подкладке; штамповку половины листов пачки, причем вторая половина листов служит подкладкой.

В табл. 2 и 3 приведены значения сопротивления сдвигу различных неметаллических материалов при их вырубке в обычных штампах и просечке ножевыми штампами.

Особенностью фибры является ее сравнительно хорошая штампуемость при вырубке деталей в равномерно увлажненном состоянии, что исключает расслоение материала. Поэтому при проектировании штампов следует учитывать изменение размеров влажной фибры при высыхании.

По данным Б. Н. Бобрынина, форма контура вырубаемых деталей и пробиваемых отверстий не оказывает существенного влияния на сопротивление сдвигу. С усложнением формы пробиваемого отверстия (шестигранная, овальная, квадратная, прямоугольная, треугольная, крестообразная, серповидная) сопротивление сдвигу уменьшается примерно на 8—10 % для гетинакса и текстолита.

Среди неметаллических материалов гетинакс подвергается только вырубке, а текстолит — вырубке и гибке с подогревом. Предельная толщина гетинакса и текстолита для изготовления деталей вырубкой для гетинакса составляет 3 мм, для текстолита 6,5 мм.

Вырубка деталей из гетинакса и текстолита в подогретом состоянии сопровождается снижением сопротивления сдвигу и улучшением качества поверхности разделения. Однако нагрев усложняет технологический процесс и снижает его производительность, вследствие чего вырубку деталей из гетинакса и текстолита рекомендуется по возможности проводить в холодном состоянии.

При пробивке отверстий диаметром 1—10 мм и вырезке деталей из гетинакса, текстолита и других слоистых пластиков (стеклотекстолита, стекловолокнита, органического стекла, винипласта, целлулоида) с подогревом до рабочего интервала температур (60—120 °С) сопротивление сдвигу уменьшается примерно на 20—30 %.

4. Предельная толщина материала при штамповке без подогрева, мм

Материал	Форма детали		Пробивка отверстий
	простая	сложная	
Гетинакс	1,5	1,0	1,5
Текстолит	2,0	1,5	2,0

Предельная толщина гетинакса и текстолита, штампуемых без подогрева, существенно ограничена (табл. 4).

В случае необходимости получения высокого качества поверхности разделения ($Ra = 2{,}5$ мкм; $Rz = 20$ мкм) следует применять зачистку штампованных деталей.

Вырубку деталей из гетинакса и текстолита производят, как правило, в совмещенных штампах с прижимом заготовки. Наличие прижима уменьшает возможность образования поверхностных трещин, наблюдаемых при штамповке хрупких неметаллических материалов и ореолов вокруг отверстий и по кромкам деталей, представляющих собой вспучивание и расслоение поверхностных слоев материала. При этом повышается качество поверхности разделения при вырубке и пробивке даже без нагрева материала.

Усилие прижима при вырубке деталей из гетинакса и текстолита определяют по формуле

$$Q = qLs, \qquad (1)$$

где q — давление прижима, МПа; L — периметр контура вырубки, мм; s — толщина материала, мм;

s, мм	До 1	1—2	2—3
q, МПа	6—10	10—15	15—20

Качество деталей, получаемых вырубкой и пробивкой. Состояние поверхности разделения деталей, получаемых вырубкой и пробивкой, определяется

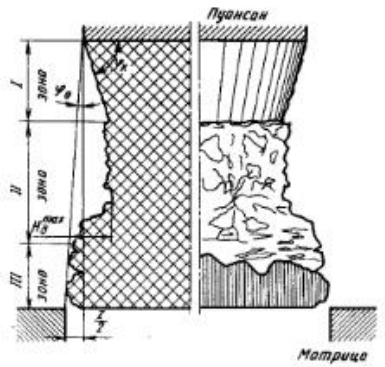


Рис. 8. Характерная профилограмма поверхности разделения при вырубке

характером напряженно-деформированного состояния материала в процессе его сдвига.

Профилограмма поверхности разделения (рис. 8) при вырубке по Б. Н. Бобрынину делится на три зоны: зона *I* — зона скалывания, имеет блестящую и чистую поверхность и характеризуется углом $\varphi_к$ и высотой; зона *II* является как бы переходной от зоны *I* к зоне *III*; в большинстве случаев зона *III* имеет поверхность с низкой шероховатостью и представляет собой область, где происходит сдвиг материала.

Максимальная глубина дефекта $H_д^{max}$ и угол скалывания $\varphi_к$ (см. рис. 8) связаны между собой и существенно зависят от различных технологических условий (температуры материала в процессе разделения, технологического зазора, толщины материала и др.).

Для деталей, отштампованных из хрупких материалов без подогрева, максимальная глубина дефекта в среднем находится примерно на расстоянии 0,6*s* от кромки пуансона при вырубке и 0,6*s* от кромки матрицы при пробивке отверстий.

Высота зоны скалывания $(0{,}3 \div 0{,}4)\,s$.

Высота зоны поверхности сдвига зависит от условий деформирования. С уменьшением толщины материала, повышением температуры, уменьшением технологического зазора и увеличением усилия прижима размеры указанных зон уменьшаются, и поверхность разделения (сдвига) становится более ровной.

Характер протекания процесса разделения при вырубке и пробивке таких материалов, как текстолит, стеклотекстолит и стекловолокнит, подобен характеру разделения гетинакса, но угол наклона скалывающих трещин (угол скалывания) $\varphi_к$ в этом случае достигает 80—88°; это определяет лучшее качество поверхности разделения, что объясняется особенностями их структуры.

Для повышения качества поверхности разделения при пробивке хрупких неметаллических материалов рекомендуется применять пуансоны специальной формы — ступенчатые, имеющие предразрушающие выступы (рис. 9), выполняющие роль предварительных пуансонов.

Механизм разрушения при пробивке ступенчатыми пуансонами иллюстрируется схемой, показанной на рис. 9:

I — стадия упругого деформирования;

II — момент, когда благодаря изгибу материала кромками предразрушающего выступа и концентрации напряжений на поверхности материала, прилегающего к пуансону, возникают первые трещины;

III — во всем объеме материала, находящегося между пуансоном и матрицей, появились сплошные разрушающие трещины;

IV — происходит отделение предварительного отхода, имеющего форму усеченного конуса;

V—VIII — моменты среза полуразрушенных волокон основным пуансоном и проталкивание отхода в матрицу.

Конструктивное выполнение ступенчатых пуансонов может быть самым различным; их применяют при пробивке отверстий различной формы.

Качество поверхности разделения характеризуется максимальной глубиной дефекта $H_д^{max}$ (см. рис. 8).

При штамповке материала с нагревом (рис. 10, *а*) величина $H_д^{max}$ существенно зависит от зазора (при $z > 8\,\%$), поэтому величина технологического зазора при вырубке и пробивке тонколистовых неметаллических материалов является одним из важнейших технологических факторов.

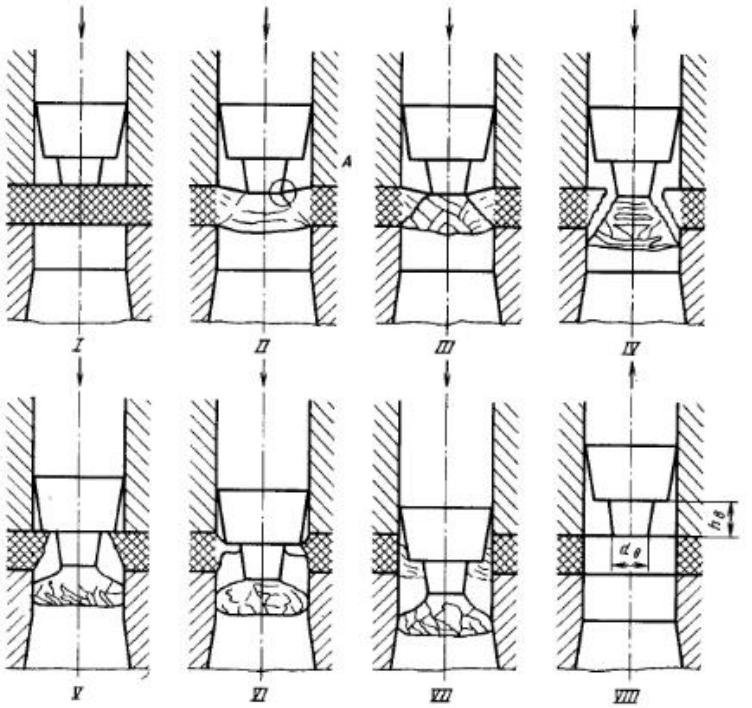


Рис. 9 Схемы пробивки отверстий пуансонами с предразрушающими выступами

Давление прижима $q_{пр}$ оказывает несущественное влияние на качество поверхности разделения (рис. 10, *б*).

При увеличении толщины штампуемого материала при заданной температуре глубина дефекта на поверхности разделения увеличивается (рис. 10, *в*), что определяется особенностями механизма разрушения рассматриваемых материалов. Из графика, показанного на рис. 10, *в*, также видно, что тонколистовые материалы толщиной до 1,5—2,0 мм можно штамповать без подогрева при соблюдении установленного технологического режима (величина зазора, усилие прижима, наличие острозаточенных режущих кромок и т. д.).

Вид слоистого пластика также оказывает влияние на качество деталей, получаемых вырубкой и пробивкой (рис. 10, *г*).

Точность деталей из гетинакса и текстолита значительно ниже точности металлических деталей, особенно при вырубке с подогревом материала. Примерная точность деталей, штампуемых из гетинакса и текстолита, приведена в табл. 5.

Выбор режима нагрева слоистых пластиков. Нагрев заготовок особенно необходим при штамповке ответственных деталей сложной формы из слоистых пластиков толщиной свыше 2 мм. При этом следует учитывать, что штамповка с нагревом материала вне штампа является примером ненадежного технологического процесса, так как его режимы трудноконтролируемы.

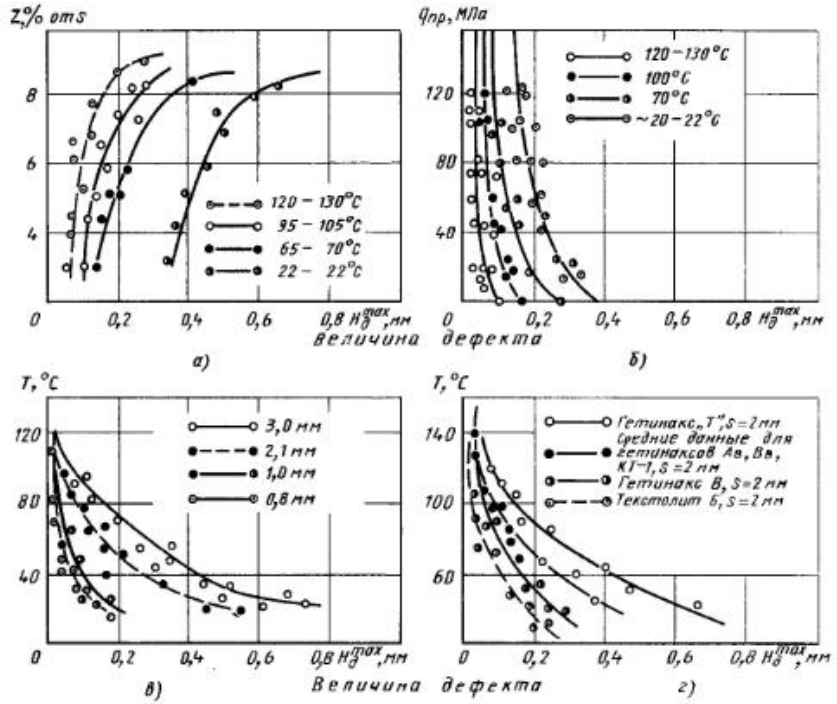


Рис. 10. Зависимость максимальной величины дефекта $H_д^{max}$ от технологических факторов при различной температуре материала:

а — от технологического зазора; *б* — от давления прижима; *в* — от толщины материала (*а—в* — материал — гетинакс Вb); *г* — от вида слоистого пластика

Каждый материал имеет определенный температурный порог, выше которого он начинает разлагаться или ста-

5. Точность деталей, вырубаемых из гетинакса и текстолита обычными штампами

Толщина материала, мм	Квалитет точности в зависимости от способа штамповки	
	Без подогрева	С подогревом
До 1	11—12	12—14
1—2	12—14	14—15
2—3	14—15	15—16

новится высокоэластичным с потерей прочности.

Для листовых пластиков с наполнителями при чрезмерном нагреве заготовок, т. е. при превышении температурного порога вследствие выделения газообразных составляющих при разложении смолы, вероятность пережога и вспучивания слоев материала увеличивается.

Для установления оптимальных режимов нагрева материалов, а также для расчета норм времени и производительности процесса штамповки необходимо знать скорость и характер охлаждения нагретых заготовок в различных условиях (на воздухе, в штампах и т. д.).

Нагрев заготовок перед штамповкой осуществляют следующими способами: в электрических термостатах; инфракрасными лампами; токами высокой частоты; в кипящей воде (15—30 мин); между двумя нагретыми плитами.

6. Режимы нагрева слоистых пластиков

Материал	Марка	Температура нагрева, °С	Способ и время нагрева 1 мм толщины
Гетинакс	Б; В; Д	90—100	В электропечах и термостатах, 3—3,5 мин
	Ав; Бв; Вв; Гв; Дв	110—120	Инфракрасными лампами, 1,5—2,2 мин
Текстолит	Все марки	80—90	Между двумя горячими плитами, 1—1,5 мин
Стеклотекстолит	—	70—90	Односторонний нагрев, 5—8 мин

Для поддержания температуры нагретых заготовок применяют штампы с встроенными в них нагревательными устройствами, которые особенно эффективны при изготовлении деталей из полос с небольшим шагом подачи или при пробивке отверстий в штампах-автоматах.

В табл. 6 приведены режимы нагрева слоистых пластиков перед вырубкой.

Расчет исполнительных размеров матриц и пуансонов. При определении исполнительных (рабочих) размеров матриц и пуансонов для разделительных операций неметаллических материалов исходят из размеров штампуемой детали, допуска на ее изготовление, характера изнашивания штампа, а также способа штамповки (с нагревом или без нагрева материала).

Методика расчета исполнительных размеров матриц и пуансонов при вырубке и пробивке деталей из неметаллических материалов подобна методике расчета при штамповке металлов. Особенностью расчета исполнительных размеров матриц и пуансонов при штамповке неметаллических материалов является необходимость учета естественной и термической усадки материала.

Расчет исполнительных размеров при вырубке и пробивке без нагрева. При вырубке деталей из неметаллических материалов без нагрева исполнительные размеры матриц определяют по формуле

$$D_м = (D_н - Δ)^{+Δ_м}, \qquad (2)$$

где $D_н$ — номинальный размер вырубаемой детали, мм; $Δ$ — допуск на соответствующий размер штампуемой детали, мм; $Δ_м$ — допуск на изготовление режущего контура матрицы, мм.

Пуансон в этом случае пригоняют по матрице с учетом назначенного зазора и с запасом на износ.

При вырубке наружных контуров допуски, назначаемые на изготовление деталей, обычно превышают значение естественной усадки (пружинения), и поэтому ее не учитывают.

7. Естественная усадка в зависимости от толщины и рода штампуемого материала

Материал	Усадка $\delta_п$, % от толщины в зависимости от диаметра пробиваемых отверстий, мм		
	1—3	3—5	Св. 5
Гетинакс	16—10	10—9	9—6
Текстолит	18—12	12—10	10—8
Стеклотекстолит	20—15	15—10	10—7
Стекловолокнит	18—14	14—10	10—5
Органическое стекло	10—8	8—6	6—3
Винипласт	12—10	10—7	7—4
Фторопласт	25—20	20—12	12—10

8. Коэффициенты термической усадки размеров деталей и упругое пружинение

Материал	Толщина материала, мм	A	C	$\delta_у$
		%		
Гетинакс	1,0	0,20	0,25	0,03
	1,5	0,22	0,25	0,04
	2,0	0,25	0,35	0,05
	2,5	0,27	0,40	0,06
	3,0	0,30	0,50	0,07
Текстолит	2,0	0,20	0,26	0,08
	2,5	0,25	0,30	0,10
	3,0	0,28	0,36	0,12

При пробивке отверстий исполнительные размеры пуансонов подсчитывают по формуле

$$D_п = (D_и + \Delta/2 + \delta_п)_{-\Delta_п}, \quad (3)$$

где $D_н$ — номинальный размер отверстия, мм; Δ — допуск на отверстие, мм; $\delta_п$ — естественная усадка; $\Delta_п$ — допуск на изготовление пуансона, мм.

Значения естественной усадки $\delta_п$ для материалов толщиной до 2,5—3,0 мм приведены в табл. 7.

При штамповке тонких материалов величина усадки меньше половины допуска на соответствующий размер; в таком случае исполнительный размер подсчитывают по формуле

$$D_п = (D_и + \Delta)_{-\Delta_п}. \quad (4)$$

При штамповке фибры размеры пробивных пуансонов рекомендуется определять по упрощенной формуле, предложенной Д. А. Вайнтраубом:

$$D_п = 1{,}035D_н + 0{,}08s, \quad (5)$$

где s — толщина штампуемого материала.

Величину усадки при штамповке слюды, целлулоида, картона, фетра, прессшпана, клингерита, бумаги и других материалов на основе асбеста и резины не учитывают из-за ее малости.

Расчет исполнительных размеров при вырубке и пробивке с нагревом. На рассеивание размеров деталей, получаемых при вырубке и пробивке неметаллических материалов, оказывают влияние два основных фактора: температура и естественная усадка. Характер их влияния на точность получаемых деталей различен. При вырубке наружного контура вследствие пружинения размеры детали увеличиваются, а в результате остывания материала вследствие термической усадки уменьшаются. Таким образом, при вырубке наружного контура усадка действует в направлении, противоположном пружинению. При пробивке отверстий усадка и пружинение направлены в сторону уменьшения размеров отверстия.

При вырубке наружных контуров их размеры могут быть больше, меньше или равны размерам матрицы.

Исполнительные размеры матриц и пуансонов при вырубке и пробивке неметаллических материалов с нагревом определяют по следующим формулам:

$$D_м = \left(D_н - \frac{\Delta}{2} + \delta_{нар}\right)^{+\Delta_м}, \quad (6)$$

$$D_п = \left(D_н + \frac{\Delta}{2} + \delta_{вн}\right)_{-\Delta_п}, \quad (7)$$

где $\delta_{нар}$ — средняя усадка при вырубке с нагревом материала, мм; $\delta_{вн}$ — средняя усадка при пробивке с нагревом материала, мм.

По данным Г. И. Хесина и А. П. Зоткина, суммарная усадка при вырубке наружного контура

$$\delta_{нар} = AL - \delta_у; \quad (8)$$

при пробивке отверстия

$$\delta_{вн} = CL + \delta_у, \quad (9)$$

где A и C — коэффициенты термической усадки размеров; L — измеряемый размер детали или отверстия, мм; $\delta_у$ — изменение размеров, вызванное упругим пружинением материала, мм.

Средние значения A, C и $\delta_у$ при вырубке и пробивке деталей из гетинакса и текстолита приведены в табл. 8.

Следует иметь в виду, что при вырубке и пробивке с нагревом материала величина упругого пружинения примерно в 2 раза меньше, чем при вырубке и пробивке без нагрева материала.

Расчет исполнительных размеров при вырубке—пробивке органического стекла и других пластмасс может быть выполнен на основе формул, приведенных для слоистых пластиков; при этом значение упругого пружинения $\delta_у$ следует уменьшить на 25—40 %.

Выбор перемычек при вырубке и пробивке. Экономичность раскроя исходных заготовок в значительной мере зависит от ширины перемычек. Ширина перемычек должна быть достаточной для того, чтобы обеспечить прочность высечки. Вследствие хрупкости ряда неметаллических материалов небольшие перемычки растрескиваются и выкрашиваются, причем их частицы попадают в зазор между матрицей и пуансоном, вызывая преждевременное изнашивание рабочих частей штампа. Кроме того, отдельные частицы материала, попадая на зеркало матрицы, вминаются в материал и ухудшают поверхность деталей, особенно при штамповке органического стекла и целлулоида, что приводит к возникновению трещин и другим дефектам.

При вырубке деталей из гетинакса и текстолита назначают бо́льшую величину перемычек, по сравнению с вырубкой деталей из металла. В табл. 9 и 10 приведены значения экспериментально установленной ширины перемычек при вырубке деталей из гетинакса и текстолита.

9. Ширина перемычек при вырубке деталей из гетинакса (размеры, мм)

Толщина материала	Круглые детали		Прямоугольные детали	
	Перемычки между деталями	Боковые перемычки	Перемычки между деталями	Боковые перемычки
До 0,5	1,5	1,5	2,0	2,0
0,5—1,0	1,5	1,5	2,0	2,0
1,0—1,5	2,0	2,5	2,5	3,0
1,5—2,0	2,5	3,0	3,0	3,5
2,0—2,5	3,0	3,5	3,5	4,0
2,5—3,0	3,5	4,0	4,5	5,0

Примечания: 1. Ширина кромки, обрезаемой шаговым ножом, берется равной ширине перемычки.

2. При вырубке деталей с поворотом полосы ширина перемычек увеличивается в 1,5—2 раза.

10. Ширина перемычек при вырубке деталей из текстолита (размеры, мм)

Толщина материала	Круглые детали		Прямоугольные детали	
	Перемычки между деталями	Боковые перемычки	Перемычки между деталями	Боковые перемычки
До 0,5	1,3	1,5	1,5	1,5
0,5—1,0	1,3	1,5	1,5	1,5
1,0—1,5	1,5	1,7	1,5	2,0
1,5—2,0	2,0	2,2	2,0	2,5
2,0—2,5	2,5	3,0	3,0	3,5
2,5—3,0	3,0	3,5	4,0	4,5

Примечание. См. табл. 9.

11. Размеры двусторонних зазоров при вырубке гетинакса и текстолита (размеры, мм)

Толщина материала	Минимальный двусторонний зазор	Максимальный двусторонний зазор в зависимости от размера вырубаемых деталей и пробиваемых отверстий, мм			
		до 10	10—50	50—120	120—260
0,5—0,6	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050
Св. 0,6 до 0,8	0,015	0,030	0,040	0,050	0,060
» 0,8 » 1,0	0,020	0,035	0,045	0,055	0,065
» 1,0 » 1,2	0,025	0,040	0,050	0,060	0,070
» 1,2 » 1,5	0,030	0,045	0,055	0,065	0,075
» 1,5 » 1,8	0,035	0,050	0,060	0,070	0,080
» 1,8 » 2,1	0,040	0,055	0,065	0,075	0,085
» 2,1 » 2,5	0,045	0,060	0,070	0,080	0,090
» 2,5 » 3,0	0,050	0,065	0,075	0,085	0,095

Примечания: 1. На чертежах штампов указывают минимальный двусторонний зазор. Максимальный двусторонний зазор является справочным при изготовлении и приемке штампов.

2. Максимальный двусторонний зазор назначают по наибольшему габаритному размеру вырубаемой детали.

Выбор технологического зазора при вырубке и пробирке. При вырубке неметаллических материалов обычными штампами назначают следующие значения зазоров: для фибры и прессшпана $(0{,}04 \div 0{,}05)\,s$; для кожи, фетра и мягкого картона $(0{,}02 \div 0{,}03)\,s$.

При вырубке и пробивке неметаллических материалов под оптимальным технологическим зазором понимается такой зазор, при котором поверхность разделения имеет высокое качество. Величина зазора зависит от рода штампуемого материала, его толщины и температуры в момент штамповки.

При вырубке и пробивке гетинакса и текстолита технологические зазоры между матрицей и пуансоном назначают меньшей величины, чем для металла, из-за хрупкости штампуемого материала.

В табл. 11 приведены размеры зазоров, в пределах которых получается качественная поверхность разделения.

Величина зазора при многослойных вырубке и пробивке неметаллических материалов зависит от числа одновременно штампуемых слоев и определяется из соотношения

$$z_{\text{мн}} = z_1 K_{\text{п}}, \qquad (10)$$

где z_1 — зазор при штамповке одного слоя (определяется в зависимости от толщины и вида материала); $K_{\text{п}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий влияние отдельных слоев материала на процесс разделения при их одновременной штамповке.

Ниже приведены значения коэффициента $K_{\text{п}}$ в зависимости от числа одновременно штампуемых слоев материала.

Число слоев	2	3	4	5
$K_{\text{п}}$	1,1—1,2	1,2—1,3	1,3—1,35	1,35—1,4

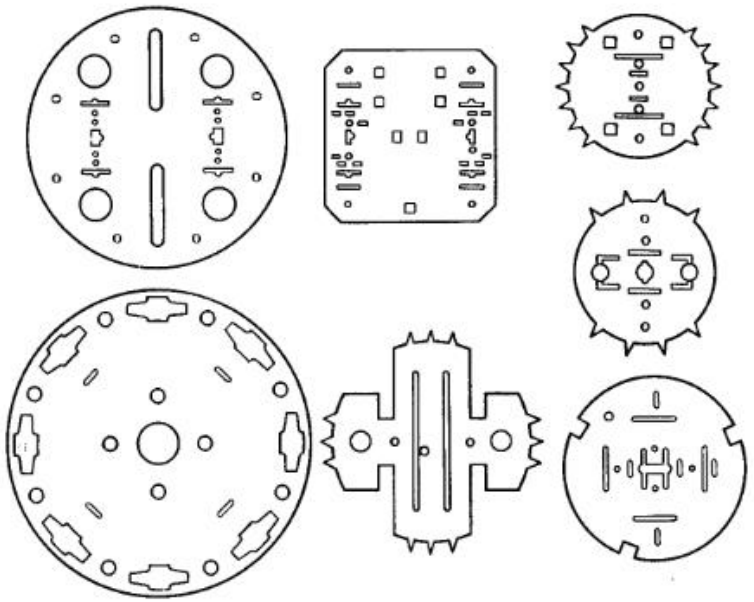


Рис. 11. Слюдяные пластинки с точными размерами отверстий

Оптимальное число одновременно штампуемых слоев определяется требованиями к качеству поверхности разделения и устанавливается экспериментально.

Особенности вырубки и пробивки слюды. Стоимость материала в общей стоимости штампованных деталей из слюды и миканита составляет 97—98 %. Поэтому вопросам экономии слюды и других неметаллических материалов придается большое значение.

Вся номенклатура деталей, изготовляемых из слюды, классифицируется по размерам на отдельные группы. Подбор заготовок осуществляется с помощью специальных шаблонов, в которых имеются круглые отверстия определенного диаметра. Это позволяет сортировать заготовки и присваивать им определенный номер подбора. В соответствии с этим детали из слюды подразделяют на большие (35 мм и выше), крупные (25—35 мм), средние (16—25 мм) и мелкие (до 16 мм).

Наиболее качественными являются детали, полученные из заготовок меньших размеров, с более высокими номерами подборов.

Особенности конструкций штампов. В приборостроении, в электронной и электровакуумной промышленности из слюды вырубают плоские слюдяные пластины (рис. 11) с достаточно точными размерами отверстий и расстояниями между их осями, достигающими 9 квалитета (сколы и расслоения не допускаются).

Для достижения высокой точности и сохранения структурной целостности штамповку деталей выполняют на штампах совмещенного действия.

Конструкция и качество изготовления совмещенных штампов для вырубки и пробивки деталей из слюды типа прокладок и пластин должны исключать запрессовку вырубленной детали в ленту при обратном ходе ползуна пресса с целью предотвращения возникновения сколов и расслоений на деталях.

В штампе (рис. 12) благодаря применению в съемнике *5* ограничивающих выступов определенной высоты (высота выступов K зависит от толщины вырубаемой детали; при толщине вырубаемой прокладки, равной 0,03—0,1 мм, $K = 0{,}5 \div 0{,}6$ мм) и

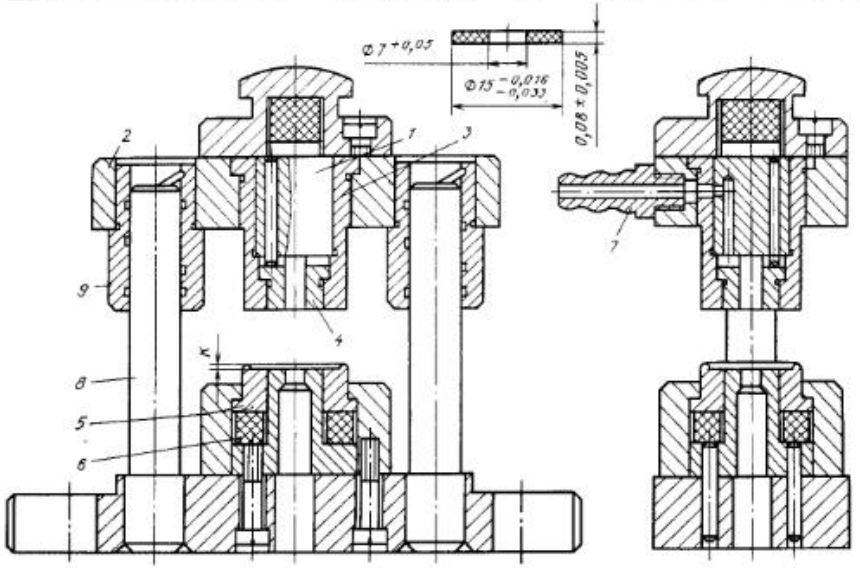


Рис. 12. Конструкция совмещенного штампа для вырубки—пробивки деталей из слюды

изготовлению выталкивателя *4* заподлицо с плоскостью матрицы *3* и пуансона *1* устраняется возникновение на поверхности разделения сколов и расслоений.

Таким образом, ограничивающие выступы съемника *5* предохраняют заготовку от давления на нее резинового буфера *6*, и под воздействием прижима находится только плоскость вырубаемой прокладки.

Для исключения образования сколов и расслоений и улучшения качества поверхности разделения при вырубке и пробивке деталей из слюды давление прижима должно составлять $q = 15 \div 20$ МПа.

Режущие части штампа монтируют в блоке с направляющими колонками *8* и удлиненными втулками *9*. Технологический зазор между пуансоном и матрицей должен быть не более 0,001—0,003 мм на диаметр; твердость рабочих частей штампа *HRC* 60—63; шероховатость рабочих поверхностей $Ra = 0{,}16 \div 0{,}08$ мкм.

Удаление (выдувку) частиц слюдяной пыли из зазоров между рабочими частями штампа производят сжатым воздухом, подаваемым через штуцер *7*, закрепленный в верхней плите *2*, в отверстие пуансона *1*.

Вырубку деталей производят с предварительным смачиванием заготовки спиртом.

Наличие частиц слюдяной пыли в зазоре между пуансоном и матрицей способствует изнашиванию рабочих частей штампа, а следовательно, и увеличению зазора, что отрицательно сказывается на качестве вырубаемых деталей.

Переточку штампов производят на плоскошлифовальном станке с последующей притиркой рабочих частей штампа в сборе специальным притиром.

Высоту цилиндрического пояска матрицы рекомендуется брать равной 1,5 мм; уклон стенок выходного отверстия — 0,5° на сторону; односторонний зазор между матрицей и пуансоном — приблизительно 4 % толщины слюды.

Сопротивление сдвигу заготовок из слюды $\sigma_{сд} = 120 \div 270$ МПа.

Стойкость штампов при вырубке и пробивке слюды. Стойкость штампового инструмента в условиях массового производства при вырубке деталей из слюды исследована А. И. Хасиным. Испытанию подвергались штампы с различными зазорами между пуансоном и матрицей. Толщина заготовок из слюды колебалась в пределах от 0,23 до 0,27 мм. Матрицы и пуансоны были изготовлены из стали Х12М и термически обработаны до твердости *HRC* 61—62.

12. Стойкость рабочих частей штампа в зависимости от зазора

№ штампа	Средний радиальный зазор $z_{ср}$, мм	Средний износ, мм		Стойкость между переточками, число нагружений
		пяти матриц	пяти пуансонов	
1	0,010	0,023	0,014	11 000
2	0,015	0,021	0,010	18 000
3	0,021	0,029	0,017	15 000
4	0,025	0,036	0,021	14 000
5	0,030	0,040	0,025	12 000

Данные по стойкости штампов приведены в табл. 12.

Оптимальная величина одностороннего технологического зазора по стойкости штампового инструмента, предназначенного для вырубки и пробивки отверстий в деталях из слюды толщиной $s = 0{,}23 \div 0{,}27$ мм составляет $z = 6$ % от s.

Штамповку слюдяных пластин или так называемых шаблонов различных размеров (7×14 мм и больше) из калиброванных пластин толщиной 0,08—0,15 мм рекомендуется производить в беззазорных штампах, обеспечивающих прямой рез без заусенцев и сколов.

Особенности вырубки и пробивки стеклопластика. Стеклопластик широко применяют для изготовления деталей типа плат в радиотехнической, приборостроительной и электронной промышленности. Он обладает достаточно высокой прочностью при малой плотности, высокой коррозионной стойкостью, низкой теплопроводностью и высокими электроизоляционными свойствами.

При обычной (без достаточного прижима) вырубке—пробивке стеклопластика происходит расслоение материала, отслоение фольги, поверхность разделения получается неровной, рваной, что снижает эксплуатационные характеристики получаемых деталей.

Применение эластичного полиуретанового прижима в штампе последовательного действия, обеспечивающего давление прижима $q = 300$ МПа, предотвращает образование расслоений и улучшает качество поверхности разделения при пробивке отверстий диаметром 0,8 мм в стеклотекстолите такой же толщины. При этом ширина зоны отслоения фольги не превышает 0,1 мм.

Наличие прижима предотвращает изгиб волокон штампуемого материала. В очаге деформации изменяется схема напряженного состояния, что улучшает качество поверхности разделения.

Для стеклопластика толщиной 0,8 мм односторонний зазор между матрицей и пуансоном рекомендуется $z = 0{,}62 \div 1{,}25$ % от s.

При пробивке отверстий с малыми зазорами уменьшается изгиб волокон материала, улучшается качество поверхности разделения, однако расслоение материала полностью не исключается.

Наложение ультразвуковых колебаний (УЗК) на пуансон-матрицу в штампе совмещенного действия или на матрицу в штампе последовательного действия оказывает более существенное влияние на силовые параметры процесса вырубки, чем величина технологического зазора (табл. 13). При этом с точки зрения снижения усилий деформирования предпочтительнее

13. Усилие деформирования при различных режимах штамповки стеклопластика

Режим штамповки	Усилие деформирования H, при зазоре, мм			
	0,005	0,015	0,025	0,035
Без наложения УЗК	12 800	12 000	11 000	9500
С наложением УЗК в пучности колебаний	6 500	6 500	5 500	5000
С наложением УЗК в узле колебаний	9 800	9 500	9 000	6 000

применение схемы подвода УЗК с расположением очага деформации в пучности колебаний.

По сравнению со штамповкой в обычных условиях, наложение УЗК на инструмент уменьшает отслоение подложки для обеих схем подвода колебаний и улучшает качество поверхности разделения.

Установка для пробивки с применением УЗК в слоистых пластиках групп отверстий с относительно малыми диаметрами (диаметр отверстия меньше толщины материала) применяется на ряде предприятий.

Качество поверхности разделения отверстий, пробитых в платах печатного монтажа из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм на установке для ультразвукового перфорирования, соответствует требованиям последующих технологических операций, в частности, гальванизации поверхностей отверстий.

Установка позволяет перфорировать с применением УЗК платы на основе гетинакса, стеклотекстолита и других слоистых и компактных материалов с размером плоскости деформирования не более 60×60 мм с максимальной плотностью расположения отверстий на плате.

Расчет стойкости разделительных штампов. Испытания стойкости разделительных штампов являются весьма трудоемкими. Математическая теория планирования экспериментов позволяет сократить объем работ, отобрать существенные факторы, разработать теоретические модели объекта и оценить их константы, определить оптимальные условия процесса и т. д.

Методы планирования эксперимента предполагают кибернетический подход к изучению процессов, внутренние закономерности которых недостаточно ясны ввиду сложности структуры самого объекта, представляя объект исследования в виде «черного ящика» с множеством «входов» (факторы) и «выходов» y (функция стойкости, параметр оптимизации, целевая функция).

В нашем случае «черный ящик» представляет собой процесс штамповки со всеми его связями, заданный бесконечно большим числом дифференциальных уравнений процесса.

Математическое уравнение такого объекта, как правило, неизвестно, поэтому функцию отклика y (например, показатель стойкости штампа) можно представить в виде отрезка полинома той или иной степени:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + b_{ij} x_i x_j, \quad (11)$$

где x_i, x_j — факторы, влияющие на y; b_0, b_i b_{ij} — коэффициенты полинома.

В результате исследования стойкости штампов для вырубки деталей из гетинакса и текстолита с применением математических методов планирования эксперимента Ф. П. Михаленко и Ю. Н. Гориовым получена формула для расчета стойкости штампов при оптимальном сочетании факторов с минимальной затратой времени:

$$T = 56{,}9 + (1{,}2x_3 - 1{,}1x_2 - 0{,}9)\,x_1 + (0{,}6x_3 + 4{,}8)\,x_2 - 3{,}5x_3, \quad (12)$$

где x_1 — технологический зазор; x_2 — температура нагрева метериала; x_3 — толщина материала.

При оптимальном сочетании факторов, полученном при крутом восхождении к оптимуму, предложены практические рекомендации по назначению оптимальной величины двустороннего технологического зазора ($z = 7{,}9\,\%$ толщины заготовки) и температуры нагрева штампуемого материала (110 °С) при изготовлении и эксплуатации штампов, предназначенных для вырубки—пробивки гетинакса и текстолита.

Расчетная формула (12) получена для вырубного штампа при следующих характеристиках факторов: штампуемый материал — текстолит толщиной 1,5 мм; контур вырубаемой детали — простой; направление рабочих частей штампа обеспечивается колонками; материал рабочих частей штампа — сталь Х12; вырубка происходит напровал как при равномерном, так и при неравномерном распределении технологического зазора.

Для практического применения формулы (12) необходимо вычислить длину интервала варьирования

$$L = 1/2\,(\lambda_{max} - \lambda_{min}), \quad (13)$$

где λ_{max} и λ_{min} — максимальное и минимальное значения количественного фактора.

Кодированное значение фактора x_i определяют по формуле

$$x_i = \pm\,(\lambda_i - \lambda_{cp})/L, \quad (14)$$

где λ_i — текущее натуральное значение фактора; λ_{cp} — середина интервала варьирования; знак минус ставится, когда значение фактора соответствует верхнему уровню варьирования ($x = +1$).

В нашем случае для факторов x_1, x_2, x_3 выражение (14) с использованием кодированного значения факторов принимает следующий вид:

$$x_1 = 1{,}4 - 0{,}16z;$$
$$x_2 = 0{,}2275z - 1{,}5; \quad (15)$$
$$x_3 = s - 2.$$

Для практической проверки формулы (12) проведем расчет стойкости штампа, предназначенного для вырубки текстолита толщиной $s = 2$ мм с нагревом его до 110 °С при равномерном распределении величины двустороннего зазора $z = 7{,}9\,\%$ от s.

В соответствии с уравнением (15) находим: $x_1 = +0{,}14$; $x_2 = +1$; $x_3 = 0$. Подставляя эти значения в выражение (12), получим стойкость штампа $T = 61{,}4$ тыс. нагружений.

При расчете стойкости штампа по формуле (12) все факторы подставляют в закодированных безразмерных величинах.

Экспериментальная проверка стойкости вырубного штампа в производственных условиях при указанных выше параметрах процесса штамповки показала, что стойкость штампа до переточки составляет до 55—67 тыс. нагружений; это указывает на достаточную точность расчета стойкости штампов по полученной формуле.

Стойкость вырубных и пробивных штампов до полного изнашивания $T_{полн}$ при штамповке деталей из слоистых пластиков (гетинакса и текстолита) может быть рассчитана по формуле (12) с введенными в нее показателями высоты H рабочей части матрицы и толщины h слоя металла, снимаемого с матрицы в процессе переточки штампа:

$$T_{полн} = 0{,}8\,\frac{H}{h}\,T_{раб} = 0{,}8\,\frac{H}{h} \times \left[56{,}9 + (1{,}2x_3 - 1{,}1x_2 - 0{,}9)\,x_1 + (0{,}6x_3 + 4{,}8)\,x_2 - 3{,}5x_3\right], \quad (16)$$

где 0,8 — поправочный коэффициент, учитывающий неточность выдерживания геометрических параметров (т. е. H и h) при переточке штампа.

По формуле (12) можно рассчитать стойкость вырубных штампов до переточки при штамповке деталей из гетинакса и текстолита толщиной 1—3 мм при разных условиях деформирования (без нагрева и с нагревом) и различных зазорах.

На основании расчетных данных о стойкости разделительных штампов до полного износа по формуле (16) можно определить потребный парк штампов для выполнения производственного плана по деталям из слоистых пластиков.

14. Режимы нагрева слоистых пластиков перед гибкой

Материал	Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева 1 мм толщины заготовки, мин
Текстолит	130—150	1,5—2
Стеклотекстолит	140—160	2—2,5
Гетинакс (не полностью отвержденный)	140—150	2—2,8
Стекловолокнит АГ-4 (не полностью отвержденный)	170—180	2—2,5

3. ФОРМОИЗМЕНЯЮЩИЕ ОПЕРАЦИИ

Практически все крупнотоннажные полимерные материалы перерабатывают по одной из двух схем:

разогрев пластика до температуры размягчения или плавления, придание ему с помощью формующего инструмента требуемой формы, охлаждение под давлением в формующей оснастке до отверждения с целью сохранения полученной формы;

разогрев пластика до пластического состояния, придание ему с помощью формующего инструмента требуемой формы, выдержка до завершения начавшихся под влиянием температуры химических реакций, приводящих к отверждению полимерного связующего в пластике и сохранению приданной ему формы.

К перерабатывающим агрегатам относятся литьевые машины, прессы, экструдеры, вакуум- и пневмоформовочные машины и др.

Производительность агрегата лимитируется временем, необходимым для отверждения материала в формующем инструменте.

К формоизменяющим операциям листовой штамповки неметаллических материалов относятся гибка, вытяжка, формовка и отбортовка.

Гибка неметаллических материалов. Гибке подвергают слоистые пластики толщиной до 2—3 мм, термопластики, эбонит, картон, фибру и формовочный миканит и другие материалы.

Гибку в штампах применяют для изготовления мелких деталей. Гибку крупных деталей производят на гибочных машинах для металла.

При гибке слоистых пластиков процесс формоизменения лучше протекает в том случае, когда применяют не полностью отвержденные материалы или материалы, полученные на основе термореактивных смол, модифицированных термопластичными или пластифицирующими добавками.

Способы нагрева пластиков при гибке определяются масштабами производства. В качестве источников нагрева применяют радиационные установки со стальными или керамическими экранами. Прогрессивным способом является нагрев инфракрасными лучами.

Режимы нагрева слоистых пластиков толщиной до 2—3 мм приведены в табл. 14.

Гибку слоистых пластиков обычно производят в простейших штампах, изготовленных из металла, специальных пластмасс, цинковых сплавов, дерева, а также песочно-клеевой массы ПСК.

В ряде случаев гибку осуществляют в штампе с предварительным нагревом последнего.

При гибке термопластиков (органического стекла, винипласта, целлулоида, полиэтилена и др.) необходимо строго следить за соблюдением температуры нагрева и его продолжительности.

Нагрев органического стекла осуществляют в тех же нагревательных устройствах, что и нагрев слоистых пластиков.

Режимы нагрева термопластиков приведены в табл. 15.

Гибку деталей из органического стекла обычно производят на металлических, пластмассовых, гипсовых или деревянных пуансонах легким нажимом руки с прижимом краев заготовки струбцинами, обитыми байкой. Поверхность пуансонов в этом случае тщательно обрабатывается и обтягивается байкой.

15. Режимы нагрева листовых термопластиков перед гибкой

Материал	Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева 1 мм толщины заготовки, мин
Органическое стекло	105—120	2—3
Винипласт толщиной до 5 мм	130—150	3—5
Целлулоид *	80—90	—
Полиэтилен	100—110	2—4

* Вследствие высокой горючести целлулоида его нагрев производят в водяных банях.

При гибке размеры заготовки и пуансона должны быть взяты большими на величину припуска для зажима кромки. Детали охлаждаются на пуансоне до 30—40 °С для сохранения приданной им формы.

Гибка картона и фибры имеет свои особенности. Перед гибкой картон и фибру предварительно увлажняют в ваннах с водой при температуре 15—20 °С в течение 1,5—2 ч на каждый миллиметр толщины. Относительная влажность заготовок должна составлять 10—25 %.

Технологический процесс изготовления гнутых деталей из фибры и картона включает следующие операции: вырубку заготовки из листа; увлажнение заготовок; гибку заготовок; сушку гнутых деталей.

Формовка и вытяжка неметаллических материалов. Посредством формовки и вытяжки изготовляют разнообразные детали из различных материалов, главным образом из термопластиков (полиэтилена, поликрилата, поливинилхлорида, органического стекла и др.), а также из фибры и картона. К таким деталям относятся детали двойной кривизны для остекления самолетов и автомобилей, рассеиватели света, абажуры, отражатели

16. Режимы нагрева листовых термопластиков перед формовкой

Материал	Температура нагрева, °С	Выдержка при данной температуре на 1 мм толщины листа, мин	Критическая температура, °С
Органическое стекло (неориентированное)	130—180	1,5—2,5	220
Органическое стекло (ориентированное):			
СОЛ	125—150	1,5—1,8	175
СТ-1	145—150	1,2—2,0	185
Пластмассы:			
2—55	170—185	1,6—2,5	205
1—57	185±5	2,5—3,0	230
Винипласт	120—140	2,5—5,0	170
Материал СНП	130—140	—	—
Полиэтилен ВД	120—130	2,0—3,0	140
Целлулоид	95—110	—	—
Текстолит	130—160	2,5—5,0	200
Стеклотекстолит	140—160	2,0—5,0	230
Формовочный миканит	250—300	0,5—0,8	—
Эбонит	60—90	—	—

Примечания: 1. Под критической температурой понимают температуру, при которой наступает интенсивное разложение (т. е. термическая деструкция) составляющих материала.

2. Нагрев листов органического стекла производят в вертикальном положении (в подвешенном состоянии).

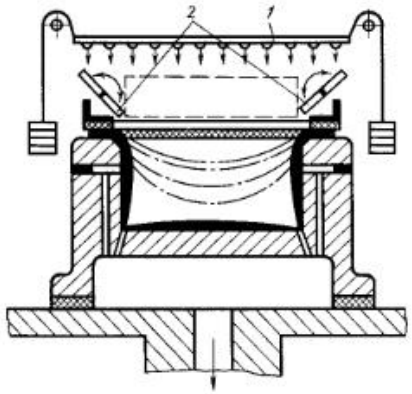


Рис. 13. Схема негативного процесса вакуумной формовки:
1 — излучатель; *2* — экраны

для люминесцентных светильников, детали холодильников, облицовки радиаторов и телевизоров, корпуса различных приборов, ванны, раковины и др.

Технология формообразования неметаллических материалов основана на рациональных режимах нагрева пластиков и перехода их в высокопластичное или вязкотекучее состояние.

Различают следующие способы формовки—вытяжки: вакуумная (или пневматическая) формовка с применением одной только матрицы или формы; формовка—вытяжка в штампах с жестким или эластичным пуансоном и жесткой матрицей.

Первый способ широко применяют при формовке деталей из термопластиков, второй — при формовке деталей из слоистых пластиков.

В табл. 16 приведены режимы нагрева термопластиков перед формовкой.

Важное значение для формовки имеет равномерность предварительного нагрева заготовок, так как неравномерный нагрев приводит к различной пластичности материала в отдельных местах, а следовательно, и к браку вследствие разрывов, трещин, коробления и т. д. Во избежание размягчения, а также структурных изменений в листовых пластиках необходимо строгое соблюдение температурного режима нагрева их перед формовкой.

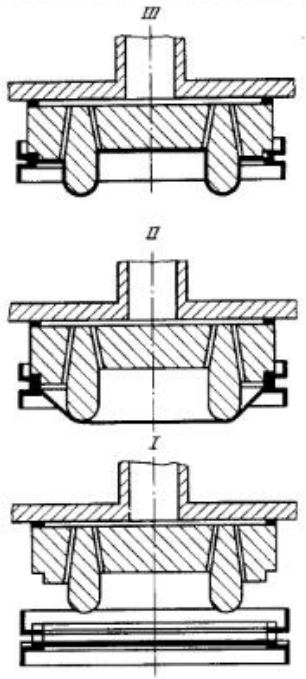


Рис. 14. Стадии позитивного процесса формовки

Для получения деталей сложных форм (шары, коробки, кюветки, предметы санитарно-технического обихода и др.) из термопластиков применяют вакуумную формовку в жесткие формы. Этот процесс характеризуется соприкосновением материала с формой в последний момент формовки.

Вакуумная формовка в жесткие формы. Различают два вида вакуумной формовки в жесткие формы: негативный и позитивный процессы.

Сущность процесса формовки (рис. 13) состоит в том, что термопластичный материал под действием вакуума постепенно формуется, вытягиваясь в полое пространство формы, приобретая контуры сферы. Негативный процесс характеризуется значительным утонением в наиболее напряженной зоне (в центре сферы). Конечная стадия формообразования детали протекает при наличии трения между деформируемым материалом и поверхностью формы, что приводит к еще большей неравномерности толщины стенок детали. Вследствие этого негативный процесс формовки применяют для изготовления неответственных деталей.

При позитивном процессе формовки (рис. 14) нагретая заготовка *I* предварительно формуется до момента получения достаточного уплотнения *II*. После этого воздух через каналы отсасывается из замкнутой полости формы, и заготовка приобретает очертания формы *III*. Этот процесс имеет те же недостатки, что и негативный.

Процесс вакуумной формовки включает следующие операции:

нагрев заготовки до заданной температуры, определяющей пластичное состояние, с помощью экрана с инфракрасными излучателями;

вытягивание нагретого листа сжатым воздухом;

формовка вытянутого листа при создании вакуума в полости матрицы (негативный процесс) или по форме пуансона (позитивный процесс);

охлаждение и удаление отформованной детали;

обрезка краев.

Вакуум-формовочные установки оснащены вакуум-насосом и компрессором, термоэкраном, пультом с приборами управления и специальными пресс-формами. Эти установки позволяют формовать изделия длиной до 2 м из заготовок толщиной до 3—4 мм.

Пневматическая формовка в жестких формах. Пневматическую формовку в жестких формах применяют для изготовления ванн, умывальников, ваз, обрамления для телевизоров и других изделий из заготовок толщиной до 15—20 мм. Пневматическую формовку осуществляют на специальных установках.

Давление воздуха, необходимое для формовки детали, зависит от конфигурации, глубины вытяжки, температуры и рода формуемого материала, температуры формы и ее конструкции. Потребное давление определяют экспериментально; как правило, оно составляет 0,05—2,5 МПа.

Процесс пневматической формовки включает следующие операции:

подготовка и нагрев материала в соответствии с установленным режимом;

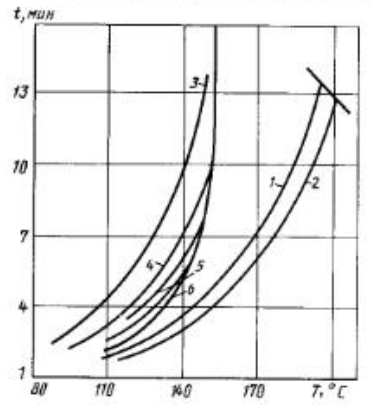


Рис. 15. Зависимость времени нагрева экструзионного и блочного листов от температуры. Толщина листа 3 + 0,5 мм. Температура шкафа °С:
1 — 200; *2* — 210; *3* — 160; *4* — 170; *5* — 180; *6* — 190

укладка заготовки на форму и закрепление ее отжимными кромками формы;

предварительная формовка при давлении 147—198 кПа в течение 15—30 с, необходимая для герметичности зажима заготовки и отверждения зажатых кромок;

окончательная формовка детали при давлении, экспериментально подобранном при опытных штамповках;

охлаждение отформованной детали в форме до 35—50 °С без снижения давления воздуха; скорость охлаждения в среднем составляет 0,5—0,8 мин на 1 мм толщины материала;

удаление отформованной детали и подготовка формы для следующего цикла формовки;

контроль полученной детали;

доводочные операции.

Получение качественных деталей методами пневматической формовки требует точного регулирования температуры листа.

Тепловой режим нагрева органического стекла — полиметилметакрилата (ПММА) устанавливается в зависимости от типа материала (экструзионный или блочный высокомолекулярный), толщины листа, конструкции и назначения детали.

Оптимальной для экструзионного листа является температура нагревательной

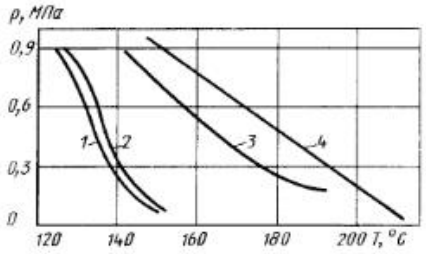


Рис. 16. Зависимость давления пневмоформования от температуры для экструзионного (*1* и *2*) и блочного высокомолекулярного (*3* и *4*) листов. Кратность вытяжки: *1* и *3* — 0,284; *2* и *4* — 0,5

ного шкафа 170—190 °С; для блочного — 200—210 °С (рис. 15).

Интервал температур формовки экструзионного листа 125—150 °С, блочного 150—200 °С. С уменьшением кратности вытяжки деталей $W = h/B$ (h — высота формы; B — ширина ее основания) граница области формования смещается в область низких температур. Нижняя граница интервала температур формовки соответствует середине области высокоэластичного состояния; верхняя граница совпадает с началом области перехода материала в текучее состояние.

Зависимость давления внутри формы от температуры листа для различных типов ПММА приведены на рис. 16.

Адекватные уравнения регрессии в натуральных переменных, полученные в результате проведения опытов по схеме полного факторного эксперимента 2^3 для расчета толщины стенки детали в местах глубокой вытяжки, имеют вид:

для экструзионного листа

$$s_к = \frac{s_н}{0{,}238t_л + 18{,}648W - 36{,}294}; \quad (17)$$

для блочного листа

$$s_к = \frac{s_н}{0{,}46t_л + 31{,}96W - 81{,}34}, \quad (18)$$

где $s_н$ — начальная толщина заготовки; $s_к$ — толщина детали в местах его наибольшей вытяжки; $t_л$ — температура листа; W — кратность вытяжки детали.

Для экструзионного листа уравнения (17) и (18) применимы при температуре заготовки 140—150 °С и кратности вытяжки 0,284—0,50; для блочного — при 170—190 °С и той же кратности вытяжки. Погрешность расчета по уравнениям (17) и (18) составляет не более 20 %.

Комбинированные способы формовки. При вакуумной и пневматической формовке крупногабаритных деталей из термопластиков характерным является наличие двух существенных недостатков: неравномерность толщины стенок отформованных деталей и невозможность получения деталей сложной формы.

С целью устранения этих недостатков разработаны комбинированные методы формовки, в которых пневматическая формовка сочетается с механической формовкой пуансоном.

Получение равномерной толщины стенок в деталях достигается различными способами: применением резиновых диафрагм переменного сечения, предварительной свободной вытяжкой, скользящим методом формовки, а также использованием специальных подкладных и формующих пуансонов различной формы и размеров.

Применяется также формовка в упругой матрице, иногда даже без использования сжатого воздуха.

Во многих случаях для получения деталей сложной формы применяют позитивную формовку с предварительной пневматической вытяжкой (рис. 17).

Этот комбинированный метод формовки состоит в следующем. Вначале исходную нагретую заготовку термопластика зажимают в рамке, которую плотно прижимают в камере (поз. *I*). Затем в камеру подают сжатый воздух, посредством которого производится свободная пневматическая вытяжка (поз. *II*) с неравномерным изменением толщины заготовки. Далее форму вместе с пуансоном поднимают вверх; при этом производится предварительная механическая формовка (поз. *III*), включается вакуум и происходит окончательная пневматическая формовка детали (поз. *IV*).

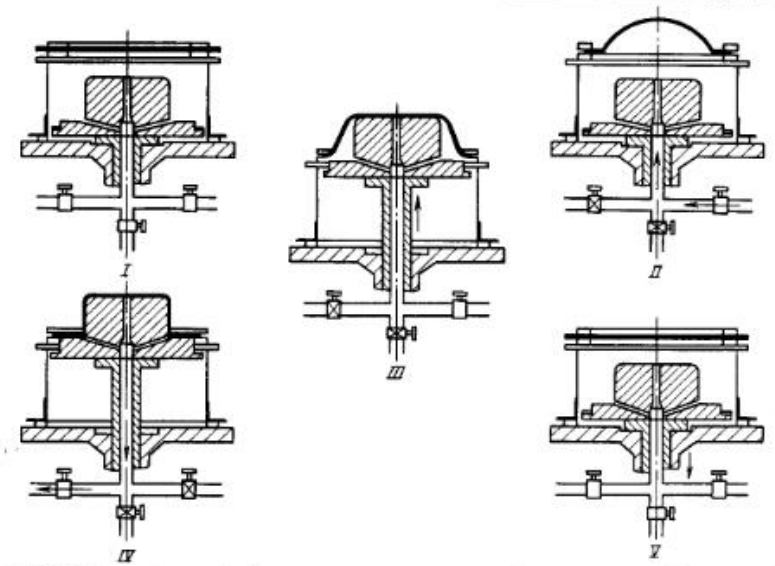


Рис. 17. Схема позитивной формовки с предварительной пневматической вытяжкой

В каждой из рассмотренных стадий формовки происходит изменение толщины отдельных частей формуемой детали, толщина ее стенок становится более равномерной.

Весьма распространенным способом получения глубоких деталей сложной формы является комбинированная формовка в «упругой» матрице (рис. 18).

Форма состоит из пневматической камеры *1*, рамки *2* с закрепленным в ней листом термопластика, пуансона *3*, прикрепленного к крышке камеры *4*, и матрицы *5*. При движении пуансона вниз происходит свободная формовка заготовки. В конце хода пуансона в донной части детали формуется рельеф на матрице *5*.

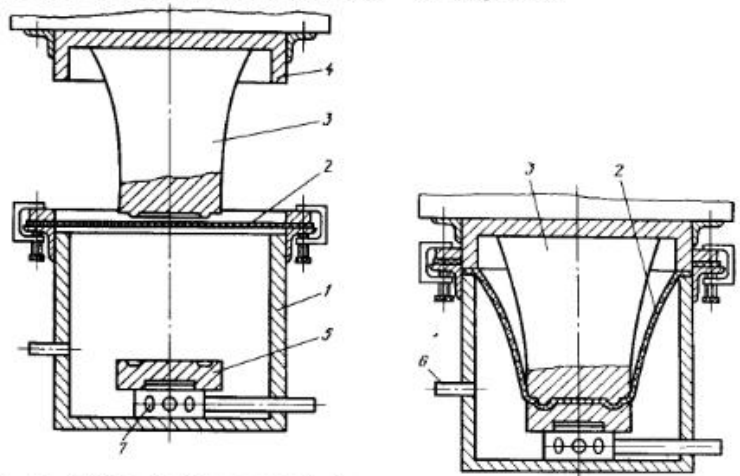


Рис. 18. Схема комбинированной формовки в «упругой» матрице

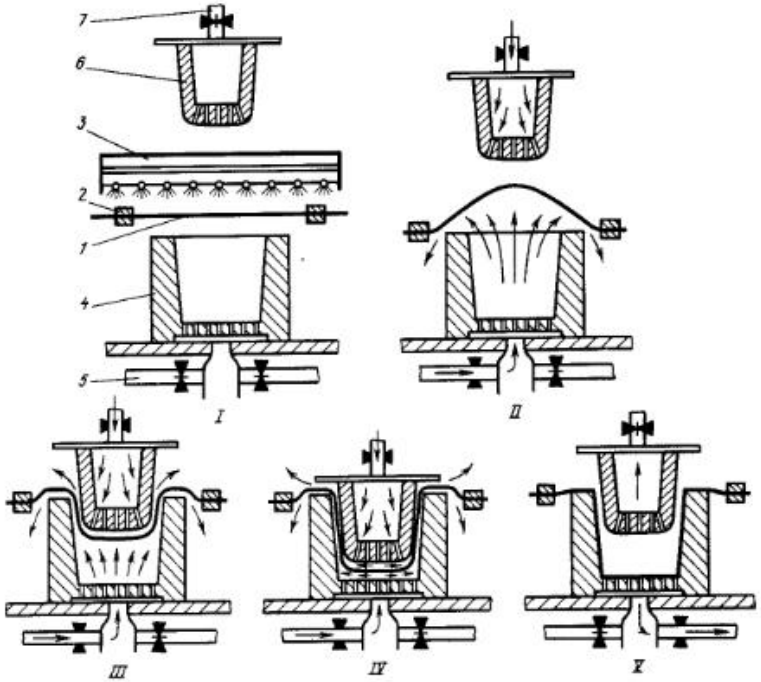


Рис. 19. Схема скользящего метода комбинированной формовки

Если камера *1* не сообщается с атмосферой с помощью крана *6*, то деформируемый материал под действием противодавления упругой матрицы будет отформовываться в виде поверхности параболической формы.

При необходимости отформовать изделие по пуансону сжатый воздух подается в камеру через распределитель *7*.

При формовании листового полиэтилена и поливинилхлорида, а также других неметаллических материалов применяют скользящий метод комбинированной формовки (рис. 19), сущность которого состоит в том, что предварительное формование детали осуществляется в разных направлениях: сначала свободная формовка вверх, а затем формовка пуансоном через прослойку сжатого воздуха. Последовательность процесса следующая. Вначале лист *1* термопластика закрепленный в рамке *2*, нагревается нагревателем *3* до заданной температуры (поз. *I*). После соприкосновения движущейся рамки *2* с торцовой поверхностью формы *4* и предварительной небольшой формовки в полость формы через вентиль *5* нагнетается нагретый воздух, под действием которого происходит предварительная пневмоформовка (поз. *II*). Далее полый пуансон *6* под действием сжатого воздуха, нагнетаемого через вентиль *7*, опускается. При этом между пуансоном и формуемым материалом образуется пневматическая подушка, посредством которой при ходе пуансона вниз осуществляется формовка листа (поз. *III—IV*). После этого вентили *5* и *7* автоматически закрываются, и через вентиль *5* подключается вакуум (поз. *V*). При ходе пуансона вверх готовая деталь выталкивается из формы сжатым воздухом, поступающим через вентиль. Метод скользящей формовки обеспечивает более равномерную деформацию формуемого материала в процессе деформирования.

Мерой деформируемости термопластиков является отношение высоты детали к диаметру заготовки.

В процессе формовки деформируемый материал находится в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, которое меняется в процессе деформирования в связи с изменением температуры.

Допускаемую степень вытяжки определяют экспериментально, в зависимости от требований, предъявляемых к детали.

В мелкосерийном производстве изготовление крупных сферических деталей из органического стекла производят или в вытяжных штампах посредством вытяжки жестким пуансоном через протяжиую матрицу с нагревом заготовки до соответствующей температуры, или формовкой под вакуумом в специальном сосуде с нагревом заготовки инфракрасными лучами.

При вытяжке заготовки жестким пуансоном через протяжное кольцо зазор между пуансоном и матрицей принимается $z = 1{,}15 \div 1{,}20$ толщины заготовки.

После остывания отформованной детали до 40—50 °С начинается движение пуансона вверх.

Вытяжку целлулоида и винипласта производят в обычных вытяжных штампах с пружинным складкодержателем. Для облегчения вытяжки целлулоида в качестве смазочного материала применяют мыло. Глубина вытяжки целлулоида при толщине материала до 2 мм достигает 50—70 мм. Отформованная деталь выдерживается под давлением около 1 мин, после чего охлаждается вместе со штампом в холодной воде.

Способ нагрева заготовок выбирают в зависимости от вида производства: путем конвекции горячего воздуха в специальных шкафах; между горячими плитами; облучением инфракрасными лучами и др.

Из слоистых пластиков вытяжке подвергаются только фибра, текстолит и стеклотекстолит. Фибру вытягивают лишь в увлажненном состоянии после вымачивания в воде из расчета 1,5—2 ч на 1 мм толщины заготовки. Перед вытяжкой заготовки и рабочие поверхности штампов покрывают тальком или графитом. Вытяжку обычно производят в вытяжных штампах с прижимом или на прессах двойного действия.

После снятия отштампованных деталей со штампа и обрезки гофров их надевают на специальные шаблоны, имеющие форму и размеры пуансона, и высушивают в сушильной камере в течение 10—12 ч при температуре 60—70 °С и относительной влажности воздуха 40 ± 5 %.

Зазор между пуансоном и матрицей при вытяжке фибры принимают $z = 1{,}05 \div 1{,}10$ толщины заготовки.

Из текстолита и стеклотекстолита в нагретом состоянии вытяжкой получают лишь неглубокие цилиндрические, конические и полусферические детали. Детали из текстолита штампуют в штампах с прижимом или на прессах двойного действия; из стеклотекстолита — в пресс-формах.

Из кожи вытягивают уплотнительные манжеты и сальники с предварительным нагревом заготовок в масле до 200 °С.

Формовка стеклонаполненных термопластиков. В нашей стране разработан материал штапол, композиция которого состоит из 25—40 % стекловолокна и 60—70 % термопластика. Штапол — штампующийся термопластичный армированный лист, предназначен для изготовления крупногабаритных деталей тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин.

Технологический процесс штамповки штапола включает резку заготовок из листа, нагрев заготовок до требуемой температуры и формовку.

Нагрев заготовок производят с помощью инфракрасного нагревателя в сушильных печах с принудительной циркуляцией воздуха. Время нагрева в зависимости от типов используемого термопластика и нагревающего устройства составляет 1—2 мин на 1 мм толщины.

Формовку детали производят в сопряженных полуформах. На формуемость штапола, помимо температуры заготовки, существенно влияют температура формы и давление формования. Для полного уплотнения матери-

17. Физико-механические характеристики листового термопластика (штапола), наполненного стеклянным волокном длиной свыше 50 мм

Материал — штапол	Плотность, г/см³	Разрушающее напряжение, МПа		Модуль упругости $\times 10^{-3}$, МПа		Ударная вязкость, кДж/м²
		при растяжении	при изгибе	при растяжении	при изгибе	
На основе:						
НЭВП	1,2—1,3	60—80 *	90—100	6—7	2—3	120—150
ПП	1,25	80—130	120—160	3—5	2—3,5	90—130

* Штапол сорта Б; получен на основе стеклохолста.

ала при температуре формы 20 °С необходимо давление 3 МПа. Величина требуемого давления зависит от вида заготовки, материала пресс-формы, конфигурации детали.

При формовании штапола наблюдаются такие нежелательные явления, как сепарация и ориентация армирующих волокон, снижающие изотропность свойств материала деталей. Установлено, что пластическая деформация не должна превышать 10—20 %. Размеры заготовки для формования деталей с изотропными физико-механическими свойствами должны максимально приближаться к размерам формуемой детали. Физико-механические характеристики штапола приведены в табл. 17.

Глава 17 СИЛЫ ТРЕНИЯ, СМАЗЫВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ПРИ ШТАМПОВКЕ

Силы трения, возникающие в процессах листовой штамповки, в подавляющем большинстве случаев являются вредными. Исключение составляют операции, в которых возникающие силы трения способствуют течению деформируемой заготовки, т. е. являются активно действующей нагрузкой. Это возможно, если скорости перемещения частиц заготовки и поверхности штамповой оснастки имеют одинаковое направление, а величина последней равна или больше первой. Такие схемы деформирования возможны при вытяжке, гибке и других видах формоизменения.

Физическая природа трения и сопутствующих ему явлений весьма сложна. В настоящее время отсутствует единая точка зрения о механизме процесса трения. Существует много теорий, на основе которых установлены зависимости для определения сил контактного трения. Наиболее простой, относящейся к ранним представлениям о механизме трения, является зависимость Амонтона—Кулона. Предполагается, что оба взаимодействующие тела являются абсолютно жесткими, а на контактных поверхностях существуют микронеровности. В этом случае сила трения T, соответствующая началу скольжения, пропорциональна нагрузке N:

$$T = fN,$$

где f — коэффициент трения, значение которого не зависит от размеров контактной поверхности при постоянном распределении нормальных напряжений.

Простота этой зависимости является причиной широкого ее распространения для оценки сил трения как в кинематических парах механизмов машин, так и при анализе технологических операций формоизменения. В последнем случае, как правило, оперируют не силами, а напряжениями, и зависимость Амонтона—Кулона записывают в следующем виде:

$$\tau = \mu\sigma_n,$$

где τ — касательное напряжение на контактной поверхности; σ_n — нормальное напряжение на контактной поверхности; μ — коэффициент контактного трения при формоизменении.

Поскольку распределение нормальных напряжений на контактной поверхности неравномерно, касательные напряжения также неравномерны. Для удовлетворения условия пластичности на контактной поверхности вводят ограничение, принимая

$$0 \leqslant \tau \leqslant \beta\sigma_s/2,$$

где σ_s — напряжение текучести деформируемой заготовки; β — коэффициент Лоде; $1 \leqslant \beta \leqslant \frac{2}{\sqrt{3}} \simeq 1{,}155$ — в зависимости от схемы напряженного состояния.

Если τ достигло значения $\beta\sigma_s/2$, то дальнейшее его увеличение, согласно зависимости Амонтона—Кулона, уже не имеет смысла, поскольку эта величина соответствует напряжению текучести при сдвиге. Это означает, что сила сцепляемости между частицами деформируемой заготовки и штамповой оснастки на контактной поверхности превышает силу сцепляемости (взаимодействия) между частицами деформируемой заготовки. Скольжение на контактной поверхности прекращается, имеет место полное прилипание; касательное напряжение, вызванное силами трения, остается постоянным.

В условиях пластического деформирования величину силы трения можно принимать постоянной и оценивать в зависимости от напряжения текучести σ_s, а также нормального напряжения σ_n. Это предложение Г. Зак-

са трансформировалось к следующей зависимости, которую в настоящее время широко применяют для оценки сил контактного трения при пластическом деформировании:

$$\tau = \mu_s \beta \sigma_s,$$

где μ_s, по предложению М. В. Сторожева, принято именовать фактором трения (коэффициентом трения по напряженю текучести).

При такой оценке сил трения необходимо иметь в виду, что напряжение текучести σ_s в поверхностных слоях заготовки и внутри ее может быть различным. Наиболее желательным является снижение напряжения текучести σ_s в поверхностных слоях заготовки. Это достигается нанесением на поверхность заготовки специальных покрытий (меднение, цинкование, форсфатирование, и др.).

Коэффициент трения зависит от природы деформируемой заготовки, состояния ее поверхности, температуры контактных поверхностей заготовки (с повышением температуры коэффициент трения возрастает), от скорости скольжения контактных поверхностей (с увеличением скорости скольжения коэффициент трения уменьшается).

Коэффициент трения зависит также от состояния контактных поверхностей рабочего инструмента, его твердости (с повышением твердости материала инструмента коэффициент трения уменьшается).

При контактном трении возможно значительное выделение тепла, в результате чего температура поверхностных слоев заготовки и рабочего инструмента повышается.

Для уменьшения сил контактного трения, предотвращения налипания металла заготовки на инструмент, появления царапин, задиров, уменьшения изнашивания штампов и улучшения качества получаемой детали применяют смазывание заготовки и инструмента.

Смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) должны обладать следующими свойствами:

создавать прочную пленку, способную под действием высокого давления удерживаться на контактной поверхности;

высокой адгезионной способностью и равномерно распределяться по поверхности;

не вызывать коррозии и механических повреждений деформируемой заготовки и инструмента, не быть вредными для состояния здоровья рабочего;

легко удаляться с поверхности штампованной детали;

обладать низкой теплопроводностью.

По механизму действия СОТС, применяемые в технологии обработки металлов давлением, можно разделить на группы: с наполнителем и химически активные.

К первой группе относят минеральные масла и водные растворы (суспензии). В качестве наполнителей применяют графит, мел, дисульфит молибдена, тальк и др. Наполнители этих смазочных материалов обладают смазочными свойствами благодаря слоистой или чешуйчатой структуре кристаллической решетки. СОТС с наполнителями наносят на поверхность заготовки. В этом случае контактные поверхности заготовки и инструмента разделены. Поскольку силы сцепления между частицами наполнителя меньше, чем с поверхностями заготовки и инструмента, то происходит уменьшение сил контактного трения со всеми вытекающими из этого последствиями.

Ко второй группе относят СОТС, в состав которых входят химически и поверхностно-активные соединения. Химически активными называют соединения, содержащие фосфор, азот, серу, хлор. Поверхностно-активными являются соединения, содержащие сульфогруппы, эфирные, амидные, аминные и др., а также медные и цинковые.

Например, в качестве поверхностно-активных смазочных материалов используют следующие составы: 2 % графита + олеиновая кислота; 2 % MoS_2 + олеиновая кислота; парафиновое масло + 1 % олеиновой кислоты; клей БФ-6; 2 % MoS_2 + 5 %-ный раствор мыла в воде.

Механизм действия второго СОТС основан на том, что трущейся поверхностью является пленка, покрывающая поверхность заготовки. Силы трения в этом случае будут меньше, чем при скольжении металлических поверхностей в условиях сухого трения.

Применение поверхностно-активных смазочных материалов обеспечивает значительный экономический эффект при штамповке крупногабаритных деталей.

Единой методики испытания смазочно-охлаждающих технологических средств для оценки их характеристик, и в первую очередь фрикционных, в настоящее время нет. Методы испытания фрикционных характеристик СОТС подразделяют на две группы: прямые и косвенные. Прямыми являются методы, позволяющие измерять силу трения или коэффициент трения непосредственно. В технологии листовой штамповки эффективность СОТС оценивают, как правило, косвенными методами, основанными на изменении силовых параметров, предельного формоизменения или износа рабочего инструмента.

Наиболее широко для сравнительной оценки СОТС используют технологические пробы по способу Эриксена — выдавливание лунки, или испытания по способам ЦНИИТмаш, Свифта, Энгельгарта и др. — вытяжка цилиндрических стаканов разных диаметров с плоским и сферическим торцом. Технологическая проба по способу Эриксена позволяет оценивать качество смазывания по глубине выдавливаемой в образце лунки. Чем больше глубина лунки, тем лучше используемое СОТС при прочих равных условиях. При испытании по способам ЦНИИТмаша и др. пригодность СОТС можно оценить по уменьшению деформирующего усилия или по улучшению штампуемости (коэффициенту вытяжки). Однако этим способам сравнительной оценки пригодности СОТС для листовой штамповки присущи недостатки, связанные с несоответствием скоростных режимов при проведении технологических проб. Поэтому наряду с лабораторными испытаниями СОТС необходимо проведение производственных испытаний.

В табл. 1 приведены результаты лабораторных испытаний, которые указывают на расхождение оценки СОТС различными способами.

1. Результаты лабораторных испытаний СОТС

Марка	Максимальное деформирующее усилие при вытяжке цилиндрического стакана по способу Энгельгарта, кН	Машина МТЛ-10Г	
		Высота цилиндрического стакана при вытяжке, мм	$h_э$ при выдавливании лунки, мм
ХС-170/8	1,4	11,74	8,92
ХС-164	0,8	11,42	8,45
ХС-163	0,8	11,42	8,57
Укринол-23	2,0	11,68	8,82
Укриол-5/5	1,4	11,69	8,61
Укринол-3п	1,3	11,67	8,70
Укринол-4	1,2	11,21	8,29
Укринол-8	1,4	11 40	8,30
Укринол-16	1,2	11,41	8,75
Укринол-16/3	1,5	11,70	8 67
Укринол-11	1,4	11,70	8,54

Роль смазочного материала при осуществлении вырубки—пробивки состоит в том, чтобы уменьшить силу трения между заготовкой и инструментом, предохранить инструмент от налипания штампуемого материала, исключить микровырывы, задиры и т. п., т. е. обеспечить высокое качество поверхности разделения (среза) и повысить стойкость инструмента. СОТС должны обладать высокой адгезией, теплопроводностью (отвод тепла из зоны резания) и не слишком высокой вязкостью (быстро проникать на поверхность разделения). Для повышения адгезии СОТС в качестве наполнителей применяют серу, хлор, фосфор, а также свинец для образования жаропрочной пленки, предотвращающей свариванне поверхностей и повышенное изнашивание инструмента. Вязкость СОТС для чистовой вырубки зависит в значительной степени от толщины вырубаемой детали; с повышением тол

2. Влияние СОТС на повышение стойкости штампов при вырубке

Операция	Изготовляемая деталь	Материал	Оборудование	Результаты испытаний
Пробивка отверстий диаметром 3,5; 5,0; 5,5 мм	Швеллер	Сталь 10 ($s = 1$ мм)	Кривошипный пресс ($P = 0,4$ МН)	Увеличение стойкости пуансонов в 2 раза; уменьшение высоты заусенцев
Пробивка отверстий диаметром 5,5; 8,5 мм, вырубка по контуру, вытяжка	Днище	То же	То же	То же
Пробивка отверстий диаметром 3,5 мм	Кронштейн	»	»	Увеличение стойкости пуансонов в 4 раза; уменьшение высоты заусенцев до 0,05 мм
Вырубка треугольного профиля зубьев с шагом 3 мм	Подпятник, ручки	Сталь 45 ($s = 1,5$ мм)	»	Увеличение стойкости пуансонов в вершинах зубьев в 2 раза; изготовление острой кромки в вершине зуба; уменьшение заусенцев по контуру
Вырубка — пробивка отверстий диаметром 3,5 мм и по контуру диаметром 27 мм (заусенцы недопустимы)	Диск	Сталь У12А ($s = 2$ мм)	Эксцентриковый пресс ($P = 0,3$ МН)	Увеличение стойкости пуансонов в 2 раза; уменьшение высоты заусенцев до 0,01 мм
Вырубка — пробивка отверстий диаметром 3,5 мм и по контуру диаметром 15 мм, формовка	Шайба	Сталь 08Х18Т ($s = 1$ мм)	То же	Увеличение стойкости пуансонов в 2 раза (диаметром 3,5 мм) при пробивке коррозионно-стойкой стали; уменьшение высоты заусенцев при вырубке и задиров на радиусах перетяжки при формовке

Продолжение табл. 2

Операция	Изготовляемая деталь	Материал	Оборудование	Результаты испытаний
Пробивка отверстий диаметром 3,2 мм (всего 264); диаметром 6 мм (всего 2016)	Листы лотков	Сталь 08Х18Т1 ($s = 1$ мм) Сталь 12Х18Н10Т ($s = 2$ мм)	Эксцентриковый пресс ($P = 0,16$ МН) Кривошипный пресс ($P =$ $= 1$ МН)	Увеличение стойкости пуансонов в 4 раза; уменьшение высоты заусенцев до 0,05 мм
Пробивка отверстий диаметром 2,8; 3,0; 3,8; 5,0 мм; фигурных отверстий, отрезка одной стороны, вырубка контура детали	Рычаг затвора фотоаппарата	Сталь 10 ($s = 2$ мм)	Эксцентриковый пресс ($P = 1,0$ МН)	Увеличение стойкости пуансонов в 2 раза; уменьшение высоты заусенцев до 0,02 мм
Пробивка отверстий диаметром 2,8 мм и вырубка по контуру (заусенцы недопустимы)	Защелка	Сталь 08Х18Т1 ($s = 1$ мм)	Кривошипный пресс ($P =$ $= 0,16$ МН)	Увеличение стойкости пуансонов при пробивке коррозионностойкой стали; уменьшение высоты заусенцев до 0,02 мм

щины вязкость СОТС должна возрастать.

В зарубежной практике для чистовой вырубки листовой стали толщиной до 4 мм рекомендуют смазочные материалы, содержащие хлор. При изготовлении деталей приборов широкое распространение получили следующие СОТС: ХС-147; ХС-163; ХС-164. Эти СОТС имеют состав: 1—2 % S; 17—21 % Cl; 0,03 % H_2O; веретенное масло. Вязкость при 50 °С ХС-147 составляет $\eta = 40 \div 55$ мм²/с, ХС-163 $\eta = 45 \div 60$ мм²/с, ХС-164 $\eta = 75 \div 90$ мм²/с; температура вспышки для ХС-147 и ХС-163 150 °С, для ХС-164 170 °С.

В табл. 2 приведены результаты испытаний стойкости пуансонов при использовании ХС-147 по сравнению со стойкостью при использовании масла индустриального И-45. Применение ХС-163 обеспечивает еще большее повышение стойкости штампов: в 1,5—2 раза по сравнению с ХС-147 в процессах чистовой вырубки ряда деталей.

Для чистовой вырубки деталей из алюминиевых листов применяют СОТС, содержащее 30—50 % керосина и 50—70 % скипидара. Добавление в СОТС керосина повышает капиллярность. Для смазывания медных сплавов применяют мыльные эмульсии.

Для удержания СОТС на контактной поверхности необходима предварительная обработка этой поверхности. Так, применение электроэрозионной обработки обеспечивает образование так называемой «кратерной» поверхности. «Кратеры» на поверхности инструмента способствуют удержанию смазочного материала при приложении высоких давлений. При наличии бороздчатой поверхности, образуемой при чистовом шлифовании, смазочный материал легко вытесняется по борозд-

3. Влияние СОТС на стойкость штампов

Материал	Толщина детали	Сложность вырубаемого контура	Стойкость штампов до переточки (тыс. нагружений)			
			Укринол-4	Укринол-2	ХС-147; Куртис-525	ХС-163
У7А		III	0,6—0,8	2,5—3,0	10—12	18—20
	1,5	II	0,8—1,0	3,5—4,0	16—20	25—30
		I	1,5	6,0	30—40	50—60
ШХ15	1,5	III	—	—	6—8	10—11
	3,5	III			2	2,5—3,0
Сталь 10	3,0	II	—	12—14	30—40	50—60

Примечание. I — простой контур типа окружности и др.; II — контур средней сложности типа многогранника и др.; III — сложный контур — ломаный с глубокими впадинами.

кам. Эффективность использования смазочных средств в этом случае снижается. В табл. 3 приведена сравнительная стойкость штампов для чистовой вырубки в зависимости от применяемого смазочного материала.

Для смазывания листовых заготовок, предназначенных для глубокой вытяжки, применяют разнообразные СОТС. Эффективность этих средств зависит от следующих факторов: рода материала, толщины листа, формы вытягиваемой детали, скорости деформации и др.

Для вытяжки деталей из низкоуглеродистой стали, в частности автокузовных деталей, применяют СОТС на основе веретенного масла (табл. 4).

Для легкой вытяжки стальных заготовок рекомендуется применять ХС-147, ХС-163, ХС-164; для тяжелой — Укринол-5/5, Укринол-23.

При выборе СОТС для вытяжки легких и цветных металлов, титановых сплавов, жаропрочных и коррозионно-стойких сталей следует руководствоваться данными табл. 5. Для вытяжки жаропрочных сталей широкое распространение получило омеднение заготовок.

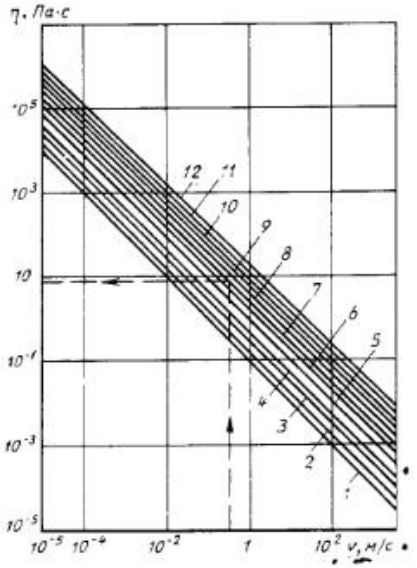
Для получения наибольшего эффекта применения СОТС большое внимание следует уделять качеству их нанесения. СОТС следует наносить ровным слоем одинаковой толщины. Существуют два способа нанесения СОТС: на поверхность заготовки (листовой, рулонный материал или полуфабрикат после вытяжки, формовки и других операций); на поверхность штамповой оснастки. При применении глубокой вытяжки та поверхность заготовки, которая будет контактировать с пуансоном, не должна смазываться (в этом случае силы трения способствуют уменьшению растягивающих напряжений в стенке вытягиваемой детали).

В условиях автоматизированного или механизированного производства жидкие СОТС наносят на поверхность заготовки вращающимися фетровыми валиками, находящимися в ваннах с СОТС. Наибольшее распространение при вырубке получило разбрызгивание СОТС по поверхности заготовки или на рабочую часть вырубного пуансона. Этот способ нанесения часто сопровождается образованием тумана (из смазочной жидкости) вблизи рабочего пространства пресса, что является его существенные недостатком.

Удаление СОТС со штампованной детали производят следующими способами: электролитическим или горячим обезжириванием в щелочных ваннах; ультразвуковой очисткой; раст-

4. Рекомендуемые области применения и составы (%) СОТС

Тип детали, подвергаемой вытяжке	Масло веретенное	Эмульсол жидкий	Зеленое мыло	Солидол	Тальк	Сера	Спирт	Вода	Графит	Сульфидированное касторовое масло	Мел	Рыбий жир	Олеиновая кислота	Мыло нафт	Гипс	Древесная мука	Кальцинированная сода	Едкий натр
Кузовная	40			40	11	8	1											
Крупная кузовная	52—54				18—20									20	2,5	5,5		
Тяжелая	33,0							13		1,5	45	1,2	5,5					0,8
Сложной формы	52,5				25									20	2,5			
Простой формы	12			25				25			20,5	12	5,5					
Детали различных форм и размеров	20			40		7	1	12	20									
	43		6			5		15	15			8	8					
			20					80										
		37						16,7			45						1,3	



Номограмма для определения динамической вязкости смазочных материалов в зависимости от скорости деформирования и средних контактных давлений между заготовкой и матрицей МПа:
1 — 15; *2* — 20; *3* — 30; *4* — 40; *5* — 50; *6* — 60; *7* — 70; *8* — 80; *9* — 90; *10* — 100; *11* — 110; *12* — 120

воренном в органических растворителях Р4 или Р5 (для пленки ХВЛ-21) и в толуоле или ксилоле (для пленки ФГ-9). В ряде случаев для удаления жиров применяют бензин или трихлорэтилен (при этом необходимо принятие мер пожарной безопасности).

Для проведения расчетов по оценке деформирующих сил, работы деформации и предельных значений коэффициента трения, а также для определения стойкости рабочих деталей штамповой оснастки рекомендуется пользоваться значениями коэффициентов трения, приведенными в табл. 6.

Вязкость СОТС существенно зависит от скорости деформирования.

В табл. 7 даны рекомендации по применению СОТС для листовой штамповки.

На рисунке приведена номограмма для выбора оптимальной динамической вязкости СОТС в зависимости от скорости вытяжки (деформирования) и средних контактных давлений.

Для высокоскоростных процессов рекомендуется применять СОТС, вязкость которых обеспечивает наличие жидкостного трения на контакте. При штамповке взрывом для алюминиевых сплавов следует применять вазелиновое масло или 10 %-ную водную мыльную эмульсию.

5. Рекомендации по выбору СОТС для вытяжки деталей из различных материалов

Материал	СОТС
Алюминий и его сплавы	Технический вазелин; эмульсия из растительных масел
Медь и ее сплавы	Суренное масло; мыльно-масляная эмульсия (смесь масла с крепким мыльным раствором)
Никель и его сплавы	Мыльно-масляная эмульсия
Коррозионно-стойкая сталь 12Х13	Кашеобразная смесь индустриального масла, графита, зеленого мыла, воды
Коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н9Т	Окисленный петролатум; хлорвиниловый лак ХВЛ-21
Жаропрочная сталь	Асфальтовый битум + 50 % окисленного петролатума; хлорвиниловый лак ХВЛ-21
Титан и его сплавы	Графитовый коллоидный водный препарат (засыхает при 20 °С в течение 30 с); хлорвиниловый лак ХВЛ-21 (засыхает в течение 3 мин); фосфатное покрытие с последующим нанесением сухого смазочного материала (молибдисульфидграфит) или омеднением

6. Значения коэффициентов трения

СОТС	Сталь	Алюминий	Д16М	12Х18Н9Т
Без применения СОТС	0,20—0,25	0,25	0,22	0,30—0,35
Минеральное масло	0,15	0,15	0,16	0,25
Минеральное масло с наполнителями (мел, графит)	0,08—0,10	0,10	0,08—0,10	0,15
Окисленный петролатум	—	—	—	0,10

7. Рекомендуемые СОТС при скоростях деформирования до 0,3 м/с

Материал	СОТС	Эффективная динамическая вязкость η, кПа·с
Стали:		
коррозионно-стойкие и легированные	Воздушно-сухое хозяйственное мыло	500
	Окисленный петролатум (высокого окисления)	30
	50 % асфальтового бнтума + 50 % окисленного петролатума	600
	Технический парафин	400
	Церезин (горный воск)	6000
	80 % коллоидного графита + 20 % масла вапор	8000
низкоуглеродистые	40 % коллоидного графита + 60 % масла	5
	20 % окисленного петролатума + + 80 % масла вапор	8
Алюминиевые сплавы, медь, латунь	Технический вазелин	0,5
	50 % окисленного петролатума + + 50 % масла вапор	0,6
	50 % хозяйственного мыла + 50 % воды	0,4

Глава 18 ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ШТАМПОВ, ОСНОВНЫХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Штампы листовой штамповки состоят: из рабочих деталей или узлов, непосредственно контактирующих с заготовкой, участвующих в осуществлении ее базирования, прижима, непосредственно операции штамповки и выталкивания; из вспомогательных деталей, предназначенных для направления движения заготовки к зоне штамповки и после нее, удаления деталей и отходов, а также из деталей, обеспечивающих взаимное положение и движение всех деталей и узлов.

Если штамп выполняет одну операцию, например, вырубку или гибку, то он называется штампом простого действия (однооперационным), если же несколько различных операций, такой штамп называют многооперационным, и в зависимости от схемы работы он может быть совмещенного или последовательного действия.

На выбор того или иного вида и конструктивного исполнения штампов прежде всего влияют масштабы и уровень инструментального производства. Поэтому для выполнения одной и той же операции в условиях единичного, серийного и массового производства существует большое разнообразие конструктивных схем. Кроме того, в выборе конструкции штампа немаловажную роль играют типаж и конкретные технические данные прессового оборудования, включающие широкую гамму моделей и модификаций.

В конструкциях штампов необходимо предусматривать средства (элементы) для удобства транспортирования штампа в целом и его отдельных составных частей массой более 25 кг с учетом использования межцеховых и внутрицеховых подъемно-транспортных средств.

Конструкция штампа должна надежно фиксироваться и прикрепляться к прессовому оборудованию. Последнее необходимо выполнять с учетом особенностей оборудования, массы штампа и возникаемых технологических усилий. На прессах с отверстием в ползуне для крепления хвостовика верхняя часть штампа, помимо хвостовика, должна закрепляться дополнительно в четырех или двух точках (рис. 1). Ползуны современного прессового оборудования изготавливают с пазами или отверстиями, предназначенными для крепления верха штампа. Применение прихватов для крепления верхней части штампа к ползуну пресса запрещается. Нижнюю плиту штампа преимущественно выполняют с пазами или отверстиями для крепления, увязанными с соответствующими пазами, или отверстиями подштамповой плиты пресса. В виде исключения допускается крепление нижней части штампа к прессу с помощью прихватов. Многие модели современных прессов, и особенно крупногабаритные, выпускают с пневмогидравлическими механизмами для автоматического крепления штампов. В этом случае места крепления на полках плит штампа конструктивно разрабатывают с учетом требований, распространяемых на данный вид крепления.

В условиях мелкосерийного или единичного производства допускается применение быстродействующего крепления штампов с использованием электромагнитов, которые устанавливают в нижних и верхних плитах специального блока. Электромагниты питаются от общей сети через низковольтный выпрямитель. Сила притяжения магнитов зависит от площади контакта частей штампа.

Крепление штампов с помощью электромагнитов целесообразно при штамповке тонколистовых деталей и, прежде всего, из немагнитных материалов. При этом допускается также выполнять штамповку из магнитных материалов. В этом случае рабочие части

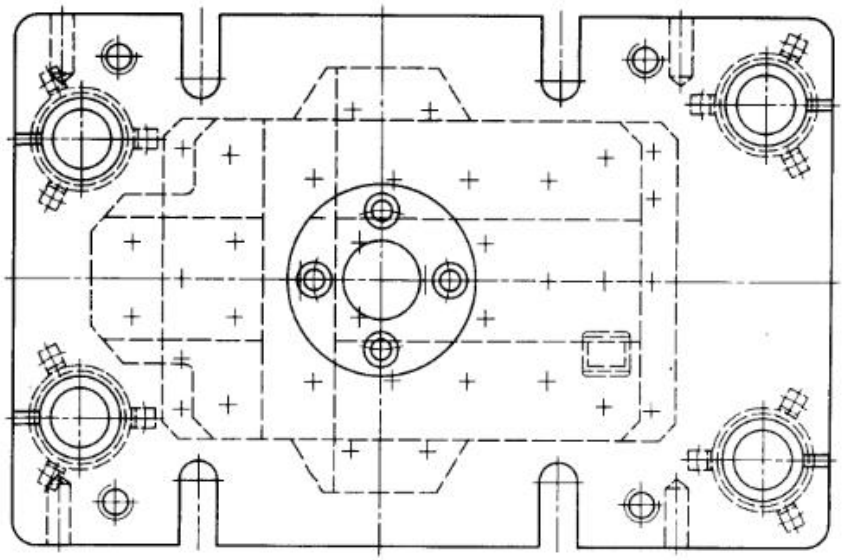


Рис. 1. Верх штампа с хвостовиком и дополнительными элементами крепления к ползуну

штампа должны иметь высоту, гарантирующую отдаление штампуемого материала от воздействия магнитного поля. По техническим условиям эта высота должна быть не менее 20 мм, что обеспечивает достаточную отдаленность электромагнитных полей от штампуемого металла.

Время, затрачиваемое на монтаж (установку) и демонтаж штампов при их эксплуатации, зависит от их массы и уровня организационно-технических мероприятий, проводимых в этом направлении. Конструкция штампа должна включать надежный элемент для быстрой фиксации штампа относительно осей пресса. При малой массе штампов элементом их фиксации, как правило, служит хвостовик. В штампах без хвостовика (преимущественно средних и крупных габаритов) элементами быстрой фиксации на прессе являются пазы (рис. 2), стыкуемые с соответствующими штырями, встроенными в подштамповую плиту. Однако для этого требуются унифицированные габаритные размеры основания (нижней установочной плиты) и высоты собранного штампа в целом. Выполнение изложенных технических требований в сочетании с применением выдвижных столов пресса значительно сокращает время установки крупных штампов. Быстрая установка однотипных унифицированных мелких штампов обеспечивается при наличии универсальных блоков, а также при использовании автоматизированного и специального оборудования. На универсальных прессах данная задача успешно решается при применении специальных установок, оснащенных быстродействующими зажимными механизмами.

При установке на пресс штампа большой массы необходимо, чтобы масса верхней части штампа не превышала массу, допускаемую для ползуна (последняя указывается в технической характеристике пресса).

Для выполнения проектных работ по конструированию штампов необходимо иметь подробную техническую характеристику пресса. Техническая характеристика пресса, помимо основных параметров, должна содержать исчерпывающие данные о буфере, о местах крепления штампа, о разме-

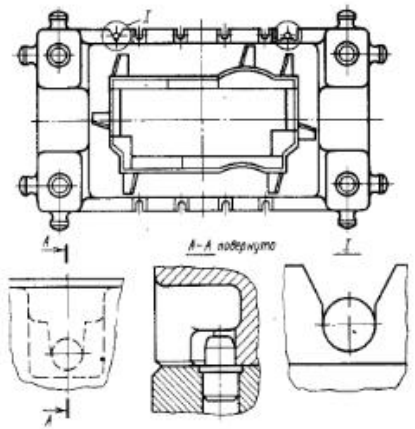


Рис. 2. Низ крупногабаритного штампа с элементами фиксации на столе пресса

рах провального отверстия в плите, сведения о механическом толкателе, графическое изображение основных проекций ползуна, станины, стола и подштамповой плиты. При применении автоматического комплекса с валковым или другим механизмом для подачи материала надо знать расстояние до «зеркала» рабочих частей штампа, шаг подачи, ее точность и др. При проектировании штампов для многопозиционных прессов или линий прессов кроме перечисленных сведений

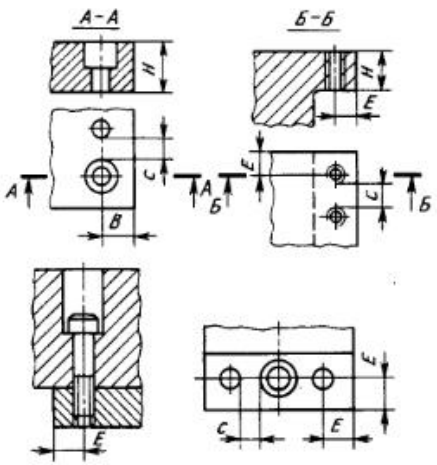


Рис. 3. Лимитированные места крепления рабочих частей (см. табл. 1)

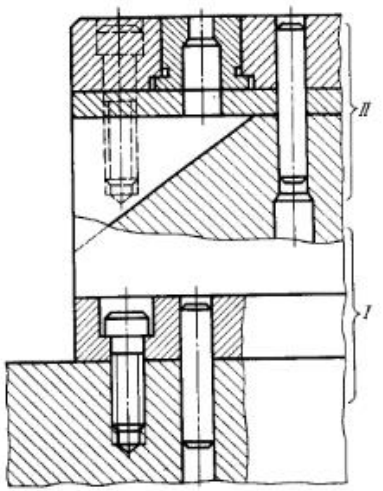


Рис. 4. Соединение четырех деталей с применением крепежа в две ступени (I—II)

необходимо иметь циклограмму процесса, сведения о захватах и др. Технически грамотный подход к конструированию штампов требует знаний об организации рабочих мест оператора, о направлении потоков штампуемых заготовок, готовых деталей, отходов и др. Использование буферов (при вытяжке, гибке и других операциях) невозможно при отсутствии сведений о размерах плиты (тарелки) буфера или координатах расположения отверстий под буферные шпильки, а также способе их применения: цельными, составными, с частичной заделкой их в подвижные детали штампа или без заделки. Учитывая многоциклическую работу штампа со знакопеременным нагружением деталей и узлов, к выбору способа крепления предъявляются повышенные требования. Основными крепежными деталями внутри штампа являются винт с внутренним шестигранником, обеспечивающий по сравнению со шлицевым более прочное соединение, и цилиндрический штифт. Материал штифтов должен иметь твердость $HRC_э$ 56—59. Наиболее целесообразно изготавливать штифты цианированными или цементированными из стали А12.

Число и диаметр деталей крепления назначают исходя из трех факторов:

1. Минимально допускаемая толщина стенок в закаленных рабочих частях штампов при размещении деталей крепления (размеры, мм)

(Обозначение (см. рис. 3)	Высота (толщина) H рассматриваемого участка детали	Диаметр винта (или штифта)						
		6	8	10	12	14	16	20
B	10—15	9	10,5	12	—	—	—	—
	Св. 15 до 20	9,5	11	13	14	16	—	—
	» 20 » 30	—	12	14	16	18	22	—
	» 30 » 50	—	—	17	20	22	27	30
C	10—15	3	4	4	—	—	—	—
	Св. 15 до 20	4	5	6	7	7	—	—
	» 20 » 30	—	6	7	8	9	10	—
	» 30 » 50	—	—	9	10	11	13	16
E	10—15	5,5	6,5	8	9,5	—	—	—
	Св. 15 до 20	6,5	7,5	9	10,5	11,5	14	—
	» 20 » 30	—	8,5	10	12	13	16	—
	» 30 » 50	—	—	12	15	16	20	23

силового, конструктивного и масштабного. Силовой фактор — расчет возникающих усилий в рабочих и вспомогательных узлах штампа. Конструктивный фактор дополняет силовой, включает решение вопросов рациональной планировки крепежных деталей штампа, так как произвольное размещение винтов и штифтов не всегда обеспечивает надежность соединения. Нередки случаи, когда по конструктивным соображениям приходится отходить от силового фактора, размещая большее число крепежных деталей или увеличивая габариты деталей штампа. Масштабный фактор влияет прежде всего на размеры крепежных деталей. Например, в крупногабаритных штампах, когда толщина плит измеряется сотнями миллиметров, несоразмерно будет выглядеть крепление рабочих деталей винтами диаметром, например, 8 и даже 10 мм, хотя по силовому расчету они вполне обеспечивают надежность соединения. Длина винтов не должна превышать норм, установленных практикой. В противном случае не будет достигнут силовой эффект, так как при чрезмерно большой длине винта в процессе его завертывания возникает недопустимая величина скручивания. Рекомендуется применять винты с длиной, не превышающей восемь его диаметров ($8d$).

Следует стремиться к ограничению типоразмеров применяемых крепежных деталей в проектируемом штампе, что значительно облегчит труд изготовителей и наладчиков штампов. Фиксация одного сборочного узла штампа обычно обеспечивается с помощью двух цилиндрических штифтов. Однако при большой длине спариваемых деталей или при необходимости увеличения прочности соединения в некоторых случаях требуется вводить три—четыре штифта. Планируя размещение крепежа на рабочих деталях, подвергаемых закалке до высокой твердости (рис. 3), необходимо соблюдать нормы максимально допускаемых толщин стенок (перемычек), установленных практикой в зависимости от толщины соответствующих деталей и от диаметра винтов, штифтов (табл. 1).

Оптимальным вариантом эффективного применения штифтов является фиксация с их помощью одновременно двух или трех деталей. Применение промежуточной тонкой детали (на-

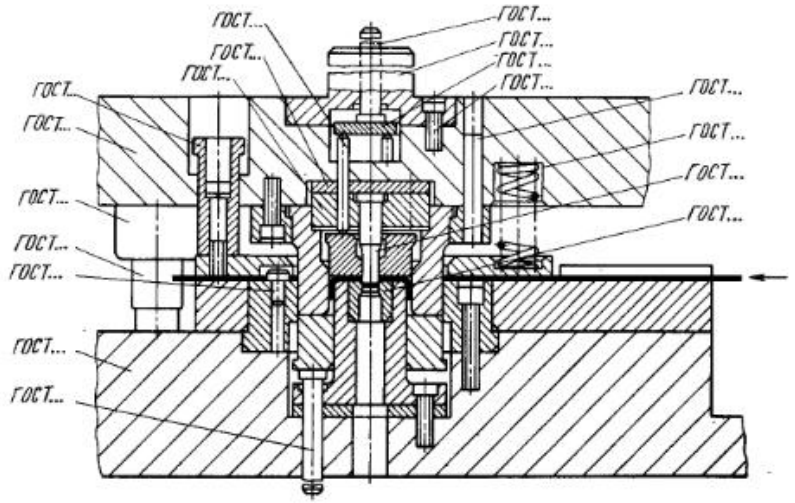


Рис. 5. Пример применения стандартизованных деталей в штампе

пример, прокладки), в которой отверстия под крепежные детали выполняют с зазором 0,5—1 мм (рис. 4), не оказывает существенного влияния на качество соединения.

По аналогии с винтом длина штифта также не должна превышать $8d$. При наличии более трех относительно высоких деталей штампа их фиксирование целесообразно выполнять ступенями, последовательно группируя их по две детали (см. рис. 4).

Ограничение хода подвижных деталей штампа наиболее надежно осуществляется с помощью ограничительных втулок (рис. 5), стержневых ограничителей (см. рис. 57) и жестко закрепленных скоб. Последние целесообразно устанавливать на штифты только в нижней части штампа. В верхней части штампа их применение не рекомендуется. Ступенчатых винтов следует избегать, так как в процессе эксплуатации штампа неизбежно изменение из «рабочей» длины при самоотвинчивании.

Разработка конструкций и изготовление оснастки в современном производстве немыслимы без широкой унификации, стандартизации деталей и узлов, что обеспечивает значительную экономию инженерного труда, способствует снижению себестоимости изготовления и сокращает время на подготовку производства. Стандартизованы в основном те детали штампа, которые относительно легко поддаются унификации. К ним относятся: детали блока (плиты, колонки, втулки, хвостовики); пуансоны и матрицы для круглых контуров; державки; фиксаторы; упоры и др. На рис. 5 показан разрез конструкции совмещенного штампа, созданного на базе стандартизованных деталей. Чем больше таких деталей в штампе, тем легче вести работы по его проектированию и тем больше возможность для перехода на автоматическое проектирование с применением ЭВМ.

Расчет экономической эффективности при проектировании штампов листовой штамповки производится на основе рекомендаций ГОСТ 19732—74 «Экономическая эффективность стандартизации».

Базовыми деталями штампа являются несущие плиты, которые в комплекте с направляющими элементами образуют блок. В крупногабаритных формоизменяющих штампах в большинстве случаев функцию нижней плиты выполняет матрица (при литье), а верхней — складкодержатель.

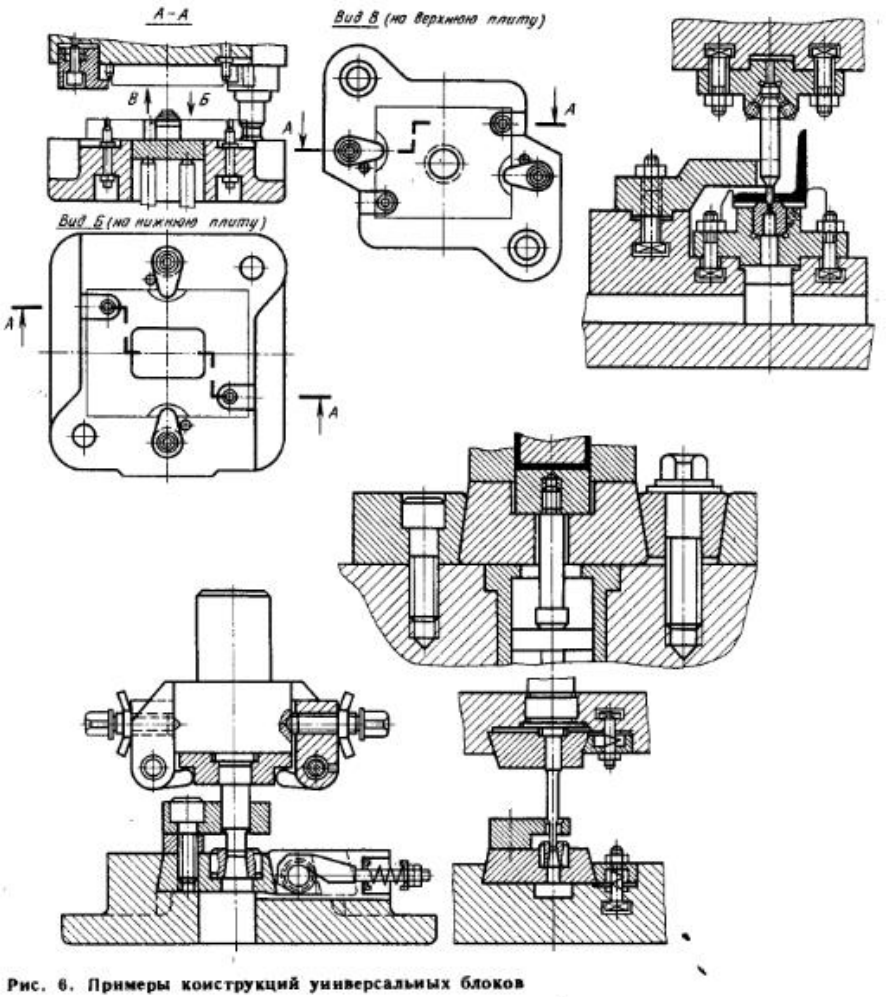


Рис. 6. Примеры конструкций универсальных блоков

Поэтому понятие «блок», не существует для этой категории оснастки. Форма (конфигурация) плит блока мелких и средних штампов определена стандартами. Однако до сих пор применяют специальные нестандартные плиты. Особенно в крупногабаритных формоизменяющих штампах. При всем разнообразии этих штампов их главные характерные признаки — число направляющих узлов и схема их расположения — сохраняются для всех форм.

Блоки с двумя направляющими узлами применяют в трех основных исполнениях: с задним расположением направляющих; с диагональным и с осевым (или близко к оси) расположениями. Блок, в которых возможна установка четырех направляющих узлов, можно выполнять не только с четырьмя, но и с тремя цилиндрическими колонками. Штампы для автоматических комплексов также рекомендуется комплектовать четырьмя или тремя колонками. Если в штампе возникают от-

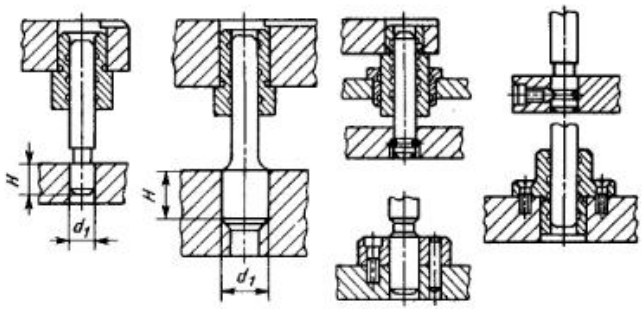


Рис. 7. Типовые конструкции направляющей пары скольжения

жимающие силы, вызывающие одностороннее давление на направляющие узлы, то дополнительно применяют призматические направляющие (см. рис. 60). Формоизменяющие штампы (особенно крупногабаритные) допускается эксплуатировать, если они имеют только призматические направляющие (см. рис. 131).

В условиях мелкосерийного производства широкое распространение получили универсальные блоки, которые позволяют применять упрощенные конструкции штампов. При ручном способе установки штампов в блок их крепят прихватами или непосредственно винтами (рис. 6), в механизированных блоках для этой цели встраивают быстродействующие зажимы.

Эффективность работы направляющих элементов в штампах во многом зависит от точности и надежности закрепления (установки) колонок и втулок в плиты блока. Относительная величина заглубления их в плиты играет большую роль для обеспечения высокоточной перпендикулярности по отношению к плоскости плит. Отношение H/d_1 (рис. 7) должно быть в пределах 1,5—2 для колонок и 1,2—1,6 для втулок. Прочность соединения гарантируется за счет посадки с натягом. Дополнительно рекомендуется применять винтовое крепление или стопорные кольца. При трении скольжения колонки с втулками пригоняют по $H6/h5—H7/e8$ — в зависимости от величины технологических зазоров и условий работы штампа. В частности, точность по $H6/h5$ достигается в прецизионных штампах. Шариковые узлы направляющих (рис. 8) в зоне движения пригоняют с натягом 0,01—0,015 мм. Учитывая необходимость соблюдения особо

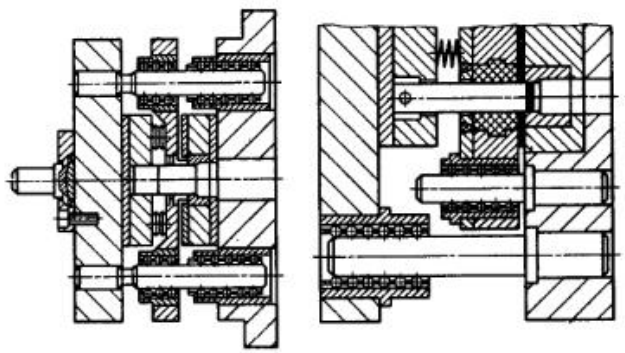


Рис. 8. Примеры применения в штампах шариковых направляющих

тщательной пригонки шариковых направляющих (по шестому квалитету), при легких работах посадочные отверстия для пуансонов, колонок и втулок целесообразно заполнять эпоксидным клеем, что облегчает их высокоточную пригонку при грубой обработке отверстий в плитах. Шариковые направляющие рекомендуется применять в штампах для разделительных операций и прежде всего, когда зазор между матрицей и пуансоном не превышает 0,025 мм при наличии рабочих частей, изготовленных из инструментальных или высоколегированных сталей и 0,1 мм — из твердого сплава.

Технология изготовления и сборки направляющих узлов штампа значительно облегчается, когда колонки или втулки устанавливают в промежуточные державки, зафиксированные штифтами.

Штампы с шариковыми направляющими, устанавливаемые на обычные универсальные прессы, целесообразно оснащать плавающими хвостовиками (см. рис. 8). В процессе работы штампа с цилиндрическими направляющими— узлами качения — выход втулок из колонок не допускается. Остальные технические требования к штампам изложены в соответствующих стандартах [ГОСТ 14672—83÷÷ГОСТ 14679—83].

Надежность работы направляющих узлов во многом зависит от наличия в них смазочного материала. Для этой цели на поверхности скольжения во втулках и на призматических направляющих выполняют смазочные канавки (см. рис. 7).

Унификация и стандартизация деталей и узлов штампов не только экономят инженерный труд и повышают качество, но и создают предпосылки для более рационального их использования. Например, быстросменное крепление рабочих частей, прошедшее широкую унификацию, предоставляет возможность эксплуатировать штампы длительное время без их демонтажа с пресса. При этом создаются условия для обеспечения взаимозаменяемости рабочих частей.

Специфика конструкций штампов потребовала разработки специального

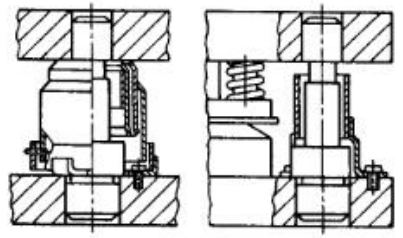


Рис. 9. Телескопическое ограждение для колонок направляющих

раздела в системе ЕСКД, посвященного оформлению соответствующих чертежей. В отличие от чертежей общего машиностроения, сборочный чертеж штампа включает: «План верха» (вид сверху на верхнюю часть штампа) и «План низа» (вид сверху на нижнюю часть штампа). В целях отражения тесной связи оснастки с технологическим процессом на сборочном чертеже вычерчивают операционный чертеж (эскиз) штампуемой заготовки, а при выполнении первой операции из ленты, полосы или специальной карты дополнительно показывают раскрой соответствующего материала.

Штампы листовой штамповки следует изготавливать в соответствии с установленными на них техническими условиями по ГОСТ 22472—77. В зависимости от конкретных схем штампов к ним предъявляют ряд дополнительных требований:

1) зазор резания на сторону должен быть обеспечен за счет пригонки сопрягаемых деталей (разделительные штампы);

2) односторонний зазор между направляющими колонками и втулками не должен превышать минимальный технологический зазор (разделительные штампы);

3) допуск параллельности поверхности ..... (верхней плиты) относительно поверхности ..... (нижней плиты) в сомкнутом положении штампа не более 0,05/300×300 мм;

4) допуск параллельности и перпендикулярности направляющих элементов и рабочих частей штампа относительно базовых поверхностей плит не ниже VIII степени точности;

5) необходимо периодически (не реже одного раза в сутки) проверять

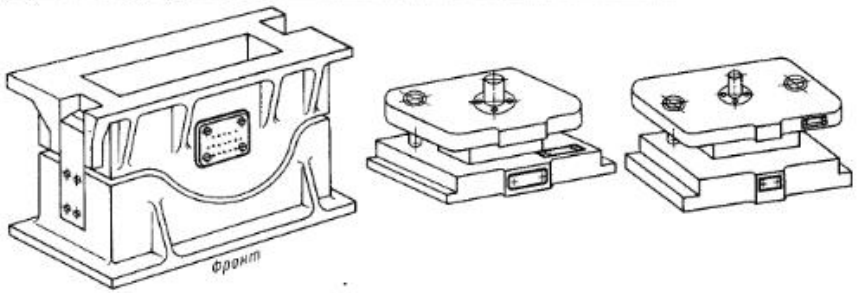


Рис. 10. Примеры применения в штампах предупредительных и информационных табличек

состояние натяжения резьбовых соединений, включая крепление штампа к прессу;

6) в штампах без принудительного (автоматического) смазывания на колонки, втулки и другие открытые трущиеся детали периодически (не реже одно раза в смену) следует наносить густой смазочный материал типа ЦИАТИМ-203 (ГОСТ 8773—73);

7) при наличии просвета между направляющими колонками и втулками в раскрытом положении штампа необходимо устанавливать оградительные кожухи (рис. 9);

8) если направляющие колонки размещены в верхней части штампа, их следует стопорить винтами;

9) зазор между пуансоном и матрицей (см. сборочный чертеж) должен быть равномерным по всей формообразующей поверхности (формоизменяющие штампы); и др.

Рекомендуется к каждому штампу прикреплять предупредительные и информационные таблички (рис. 10) с соответствующим текстом, например: «Работать с двуручным включением для каждого рабочего»; «Работать пинцетом»; «Отходы удалять воздухом» и др.

Относительный объем чертежно-конструкторских работ определяется в прямой зависимости от величины планируемых партий штампуемых деталей. При мелкосерийном производстве основной объем падает на разработку пакетов (рабочих комплектов), которые устанавливают в универсальные блоки, а также на привязку и корректировку универсально-переналаживаемых штампов применительно к конкретным штампуемым деталям. Разработка новых оригинальных конструкций штампов сводится к минимуму. Напротив, в крупносерийном и массовом производстве возникает необходимость выполнения больших объемов проектных работ по конструированию оригинальной оснастки с привязкой ее к автоматическим комплексам. Значительная потребность в оригинальных штампах обусловливается применением в широких масштабах последовательной и последовательно-совмещенной штамповки, которые требуют разработки преимущественно индивидуальных схем раскроя и конструкций штампов.

2. ШТАМПЫ ДЛЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

В зависимости от конфигурации штампуемой заготовки и необходимой точности ее размеров разделение листового (полосового, ленточно-рулонного) материала может осуществляться без отходов и с отходами.

Односторонняя отрезка (без отхода) является простейшим способом разделения исходной полосы (ленты) в штампе на мерные заготовки.

Отрезка заготовок от полосы (ленты) без отхода рентабельна, когда к точности размеров полученных деталей (заготовок) не предъявляется высоких требований. Прежде всего это относится к размеру детали по ширине ленты (полосы), который зависит не от точности изготовления штампа, а от допуска на этот размер в состоянии поставки материала. Допуск на ширину проката ленты (полосы) ориентировочно соответствует $h12$. В этих же пределах достигается точность ширины полосы при резке их на гильотинных ножницах. Размер L заготовки можно получить с более высокой точностью, в зависимости от способа фиксации материала по шагу подачи, однако стабильность размера не гарантируется (рис. 11).

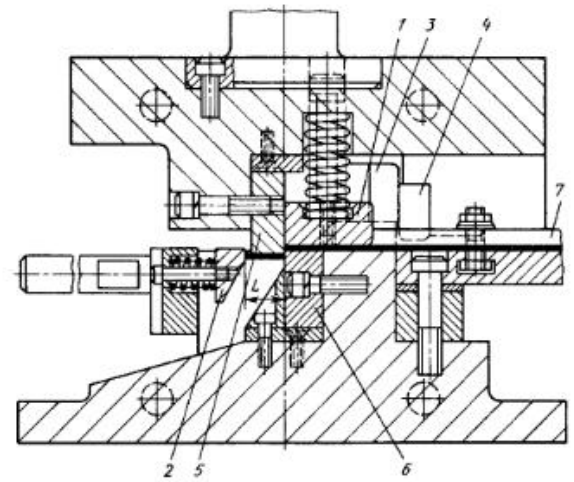


Рис. 11. Безотходная отрезка заготовок с прижимом исходного материала

Для отрезки заготовок применяют штампы в двух основных исполнениях: с прижимом исходного материала и с прижимом отрезаемой заготовки и штампуемого материала. При первом исполнении (рис. 11) отрезаемая заготовка длиной L в процессе разделения находится в свободном состоянии, а исходный материал (в виде полосы, ленты и др.) защемляется подпружиненным прижимом *1* и непрерывно тормозится боковым прижимом (см. рис. 19, *б*). Регулируемый упор-амортизатор *2* обеспечивает заданную длину отрезаемой заготовки. Взаимно спаренные противоотжимы *3* и *4* предотвращают сдвиг верхней части штампа относительно нижней, что необходимо для сохранения режущего зазора между ножами *5* и *6* во время резания. Прижим *1* вступает в работу до сближения режущих кромок, предотвращая прогиб и сдвиг исходного материала в процессе резания. Боковой подпружиненный прижим (на рисунке не показан) постоянно удерживает полосу (ленту) в контакте с направляющей планкой *7*, гарантируя фиксацию полосы при доведении ее до упора *2*.

Второе исполнение конструкции предусматривает защемление не только исходного материала, но и отрезаемой заготовки (рис. 12). Это обеспечивает получение более высокого качества поверхности разделения и сохранение плоскостности заготовки.

Рассмотренные схемы штампов для отрезки заготовок из тонколистового материала (ориентировочно толщиной до $s = 3$ мм) с фиксацией и торможением полосы (ленты) боковым прижимом непрерывного действия являются наиболее распространенными. Если же обрабатывается толстолистовая полоса (толщиной более 3 мм и

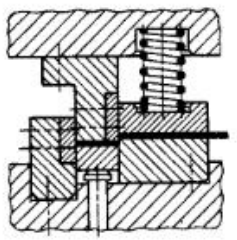


Рис. 12. Безотходная отрезка с прижимом детали и исходного материала

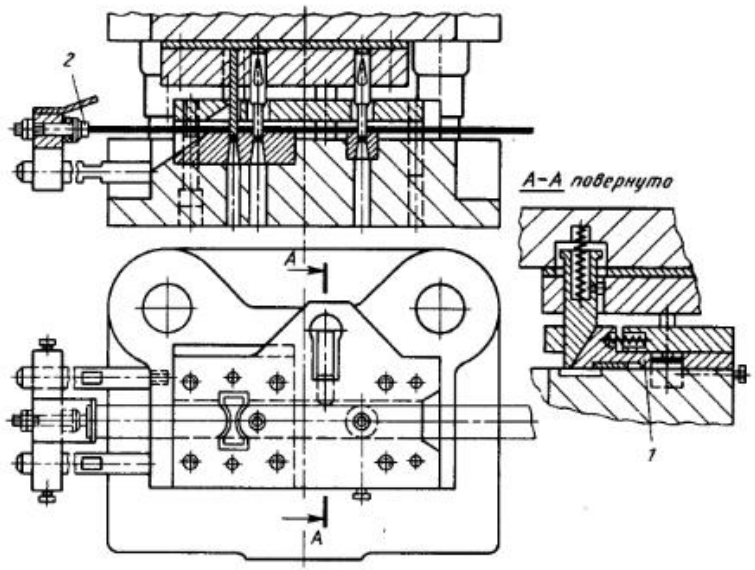


Рис. 13. Применение прижима прерывного действия в штампе для разделения полосы при $s > 3$ мм

массой более 10 кг), то при резком продвижении ее до упора происходит упругий удар и отскок заготовки в сторону, противоположную направлению подачи. В этом случае торможение от бокового прижима оказывается недостаточным и прибегают к более эффективным средствам. Одним из них является применение усиленного упора-амортизатора *2* (рис. 13), который поглощает энергию удара. Одновременно усиливается и боковой прижим. В мелкосерийном производстве при ручной подаче, кроме усилия, необходимого для проталкивания тяжелой массы полосы, оператор должен приложить дополнительную физическую нагрузку на преодоление сопротивления бокового прижима. Для того чтобы снять с оператора эту нагрузку, в конструкцию штампа вводят прижим *1* (см. рис. 13) прерывного действия, который воздействует на полосу только в момент разделения материала (при опускании ползуна), освобождая ее в период подачи (при подъеме ползуна). Недостатком прижима прерывного действия является необходимость проведения более строгого контроля за соблюдением контакта полосы с упором, так как в тот момент, когда происходит отталкивание ее в результате инерционного воздействия, боковой прижим не работает. Поэтому особенно необходимо оснащать штамп упором-амортизатором *2*.

Когда силы сопротивления продвижению полосы (ленты) во время подачи легко преодолимы, следует применять боковой прижим комбинированного действия (рис. 14), который одновременно обеспечивает прижим полосы к боковой стороне и ее торможение при сдвиге от силы инерции.

В условиях единичного и мелкосерийного производства скорость подачи материала относительно мала, и вопросы о применении всевозможных средств для погашения удара и отскока не стоят так остро. Соответствующие конструкции штампов совершенствуются по универсальности — обеспечению переналаживаемости по двум основным параметрам: длине и ширине отрезаемой заготовки. С этой целью в конструкции штампа предусматривают регулируемый упор *1* (рис. 15), который устанавливают по линейке *2* со шкалой. Для фиксации полосы по ширине служат передвижные планки *3*, закрепляемые винтами. Учитывая, что универсально-переналаживаемые штампы предназначены для широкой номенклатуры деталей, включая детали с повышенными требованиями к качеству, их целесообразно оснащать двумя прижимами: для полосы и для штампуемой заготовки (см. рис. 12).

Получение штампуемых заготовок с высокой стабильной точностью обеспечивается при разделительных операциях в штампах с охватом всего контура штампуемой детали. Вырубка может осуществляться одновременно по всему контуру заготовки (детали) в одной позиции и последовательно — с расчленением контура на отдельные участки, которые выполняются за несколько ходов пресса в процессе перемещения штампуемой полосы (ленты) с позиции на позицию.

Конструкция штампа для вырубки заготовки по всему контуру в одном ручье с жестким съемником показана на рис. 16. В исходном материале (полосе, ленте) образуются перемычки шириной a и b. Подачу полосы на шаг t при малых партиях штампуемых деталей производят вручную справа—налево с периодической переброской полосы через упор *1*. Щель съемника *2* для съема штампуемого материала с пуансона *3* должна быть достаточной для свободного продвижения полосы с учетом наличия упора. Рекомендуемые размеры щели приведены в табл. 2.

В комплект штампа входят направляющие узлы (колонки с втулками), что дает возможность выполнять рабочие окна в съемнике с увеличенным зазором с пуансонами (0,2—0,5 мм). При этом снижаются требования к фиксации съемника; отверстия под штифты, фиксирующие его с матрицей, выполняют с гарантированным зазором по $H9$ или $H11$, что облегчает доступ к матрице во время ее восстановления (заточки). Вырубленная заготовка (деталь) свободно падает направал (при наличии отверстия в подштамповой плите и относительно малых габаритах детали) или принудительно удаляется воздухом через нишу плиты штампа. Последнее можно выполнять вручную при малых партиях и механизированным способом (струей сжатого воздуха или механическим сбрасывателем) при больших партиях штампуемых деталей.

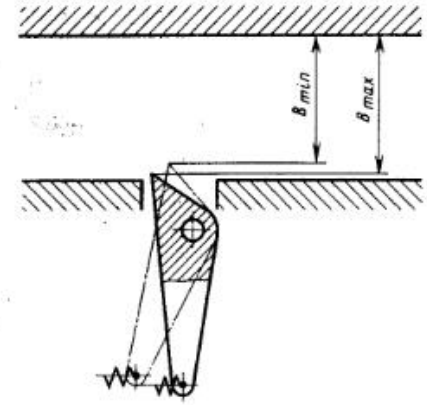


Рис. 14. Клинорычажный прижим-тормоз постоянного действия (B — ширина ленты)

Шлифование (восстановление) матрицы в процессе эксплуатации удобнее

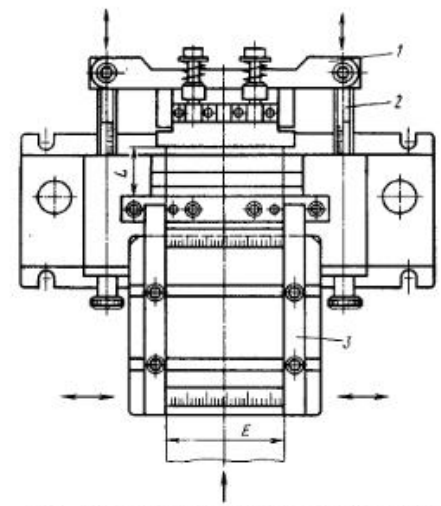


Рис. 15. План конструкции универсально-переналаживаемого штампа для отрезки заготовок (B — ширина ленты; L — шаг подачи)

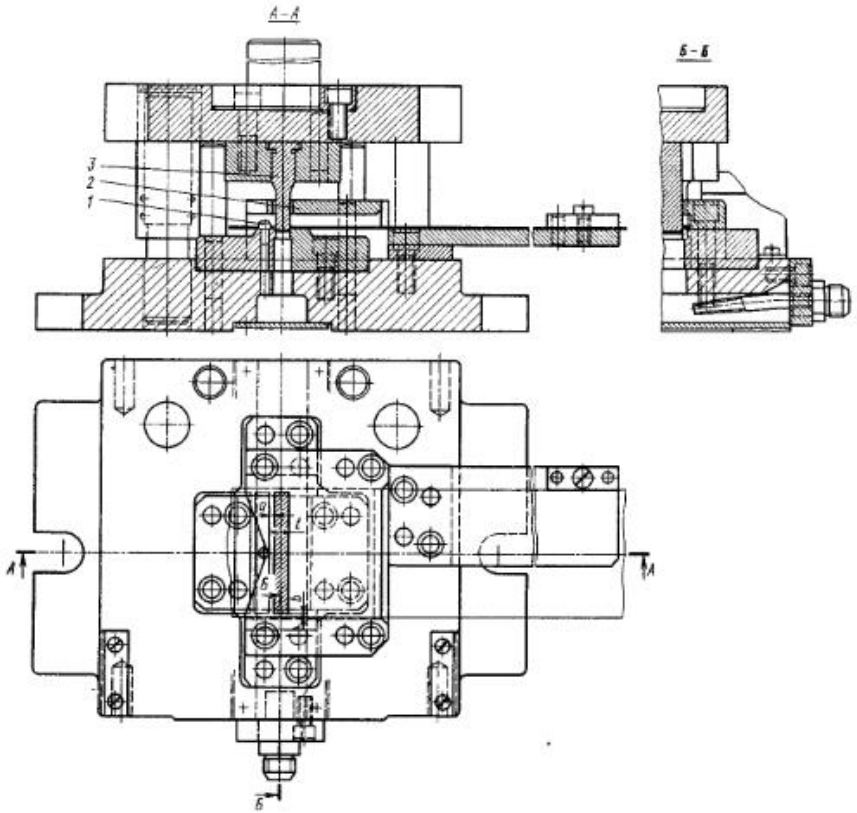
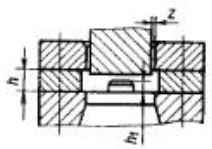


Рис. 16. Штамп для вырубки с жестким съемником

производить без упора, поэтому для его выпрессовки в матрице и нижней плите предусматривают сквозные отверстия. Доступ к «зеркалу» матрицы может осуществляться также при применении быстросменных упоров. Среди разнообразия упоров, применяемых при раскрое материала с перемычками, особое место занимают автоматические упоры, которые вступают в работу периодически — синхронно с ходом ползуна пресса, от клинового или

2. Высота просвета h между матрицей и съемником (размеры, мм)



Толщина материала s	Высота упора h_1	h (ориентировочно)	
		с упором	без упора
До 1	4	8—10	4—6
Св. 1 до 3	4	10—12	5—8
» 3 » 8	4—6	$h_1 + 2s$	(2—2,5) s
» 8	8—10	$h_1 + 1{,}5s$	(1,5—2) s

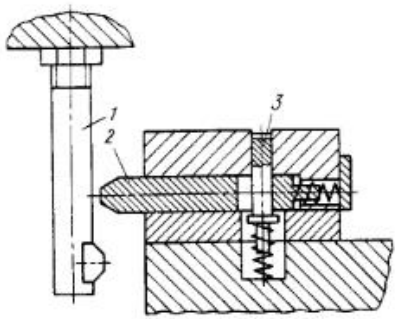


Рис. 17. Конструкция автоматического упора

рычажного привода. На рис. 17 приведена типовая конструкция соответствующего узла с приводом от клина *1*, воздействующего на ползушку *2*. Работа подпружиненного упора *3* ясна из чертежа. Главным преимуществом автоматических упоров является возможность непрерывного продвижения ленты (полосы) без подъема и переброски ее во время штамповки.

Для выполнения операций вырубки — пробивки нередко применяют штампы с консольным (козырьковым) жестким съемником (рис. 18). Подобная конструкция целесообразна в тех случаях, когда ширина обрабатываемой заготовки не лимитирована. В открытую щель съемника можно загружать полосы, ленту, отдельные заготовки или полуфабрикаты и различные отходы. Недостатком работы подобной конструкции является неблагоприятная схема нагружения съемника при съеме материала с пуансона. Возникаемый при съеме изгибающий момент требует применения усиленного крепления съемника. Независимо от усилия съема располагать винты только в один ряд не допускается. Их размещают, как правило, в два ряда (*I—I* и *II—II*) с максимальным приближением ряда *I—I* к рабочему контуру штампа. Пренебрегая (для приближенных расчетов) наличием ряда винтов *II—II*, усилие, воспринимаемое винтами ряда *I—I*, определяют исходя из действия изгибающего момента от силы T, равной усилию съема штампуемого материала с пуан-

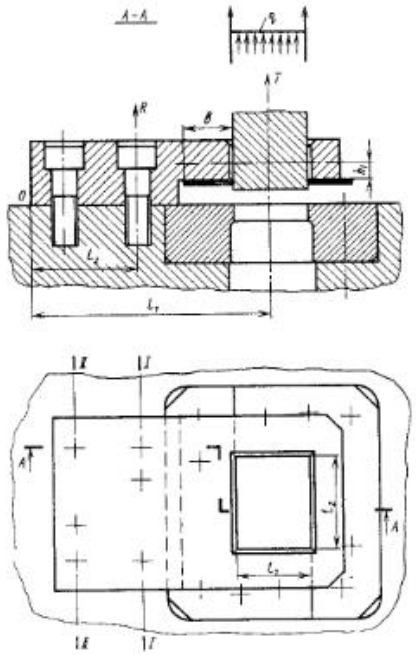


Рис. 18. Схема к расчету консольного съемника

сона, приложенной в центре тяжести контура разделения:

$$T = K_{\text{кор}}\eta_{\text{п}}P,$$

где $\eta_{\text{п}}$ — относительное усилие съема (см. табл. 8); $K_{\text{кор}}$ — коэффициент, приведенный на с. 391, в зависимости от b/l_1 (см. рис. 18);

$$P = 2(l_1 + l_2)s\sigma_{\text{сд}}.$$

Сила T создает момент $M_0 = TL_1$ вокруг точки O (см. рис. 18) против часовой стрелки. Нагрузка, воспринимаемая винтами на линии *I—I* без учета влияния затяжки винтов на линиях *I—I* и *II—II*,

$$R = TL_1/L_2. \qquad (1)$$

В поверочном расчете толщины съемника h его консольную часть рассматривают как балку, защемленную одним концом по линии *I—I*. Напряжение

$$\sigma = M_1h_1/J \leqslant [\sigma]_{\text{изг}},$$

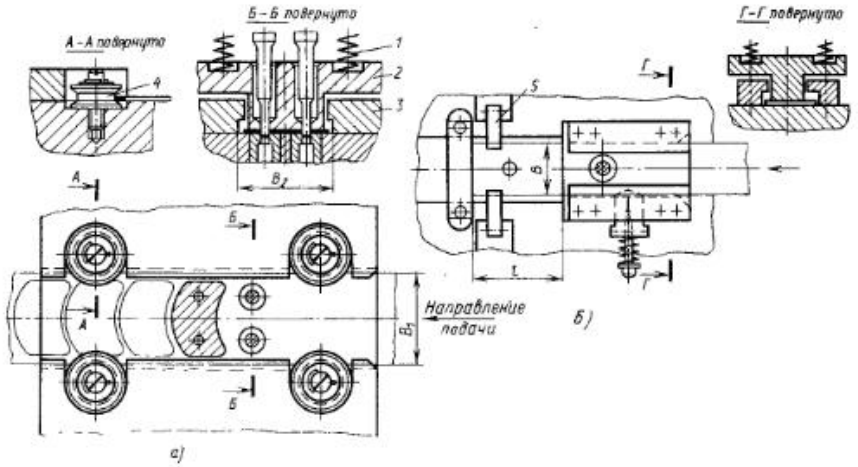


Рис. 19. Конструктивные элементы разделительных штампов с пружинным съемником

где M_I — изгибающий момент в сечении $I-I$; $M_I = T(L_1 - L_2)$; J — момент инерции сечения относительно центра тяжести; h_1 — расстояние до центра тяжести; $[\sigma]_{изг}$ — допускаемое напряжение на изгиб.

Схема вырубки—пробивки с пружинным съемником (рис. 19) находит применение преимущественно для обработки относительно тонких металлов ($s \leqslant 2$), когда суммарное усилие съема материала с пуансонов невелико и позволяет без особых трудностей разместить необходимое число пружин *1*. В отличие от штампов с жестким съемником обзор рабочей зоны больше, так как значительная площадь зеркала матрицы остается открытой. Планки *3* для направления ленты в штампе выполняют с козырьками (фланцами), которые удерживают ленту в рабочей зоне при подъеме съемника *2*. Кроме того, они необходимы для заправки ленты в штамп. Если лента подается механизмом автоматической подачи, то целесообразно встраивать в штамп ролики *4*, заменяя трение скольжения (по планкам *3*) на трение качения. В этом случае размер B_1 между роликами должен быть на 0,2—0,5 мм меньше размера B_2 между планками. Для удерживания отрезаемой заготовки от провисания, когда ее ширина B значительно меньше длины l, рекомендуется применять подпружиненные поддержки *5*. «Открытый» штамп для эксплуатации удобнее, чем «закрытый», однако он требует защитного ограждения при установке его на пресс, который не оснащен защитными устройствами.

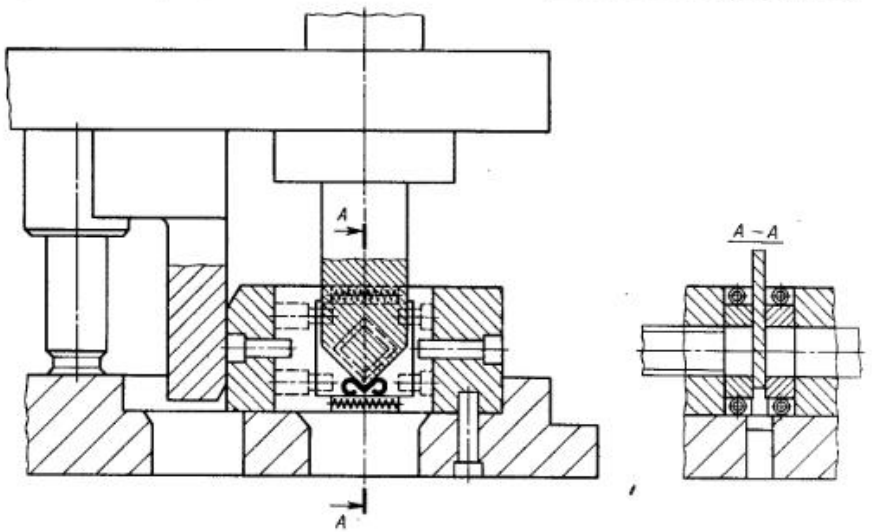


Рис. 20. Схема разрезки (с отходом) трубы квадратного сечения

Штампы для разделения труб, различных гнутых профилей и проката со сложным поперечным сечением имеют свои особенности. Закрытые профили, в том числе и прямоугольные трубы, разделяются только с отходом (рис. 20), а открытые — двумя способами: без отхода и с отходом. В первом случае пуансон выполняют заостренным, во втором (для открытых профилей) — со специальной геометрией в зависимости от формы сечения профиля (см. рис. 54). Прижим исходного проката в процессе разделения обязателен.

Возросшие требования современного производства обязывают проектантов работать над сокращением количества технологических операций, поэтому отрезка заготовок без одновременного выполнения каких-либо других операций применяется редко. Наиболее распространен способ вырубки деталей по совмещенной схеме в одной рабочей позиции. Основой любого такого штампа служит пуансон-матрица *8* (рис. 21, *а*), имитирующая своим рабочим контуром в плоскости «зеркала» штампуемую деталь одновременно по ее периметру и отверстиям. По периметру рабочего контура пуансон-матрица охватывается матрицей *3*. Между ними образуется равномерный технологический зазор резания. Пуансон *2* для пробивки отверстия стыкуется (при соблюдении такого же зазора) с соответствующим отверстием в пуансон-матрице.

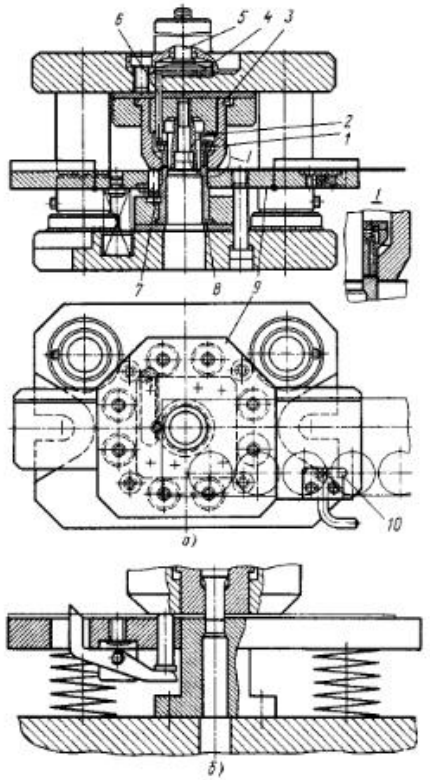


Рис. 21. Конструкция штампа и автоматического упора при совмещенной вырубке—пробивке деталей

При вырубке отделенная от полосы (ленты) заготовка заглубляется в матрицу и запрессовывается на пуансоны с последующим проталкиванием ее в противоположном направлении с помощью механического выталкивателя пресса или от пружин. Промежуточной деталью для проталкивания (съема) заготовки служит выталкиватель *1*, непосредственно контактирующий со штампуемой деталью. Остаток полосы (ленты) снимается с пуансон-матрицы подпружиненным съемником *9*. Последний одновременно удерживает и направляет исходный штампуемый ма-

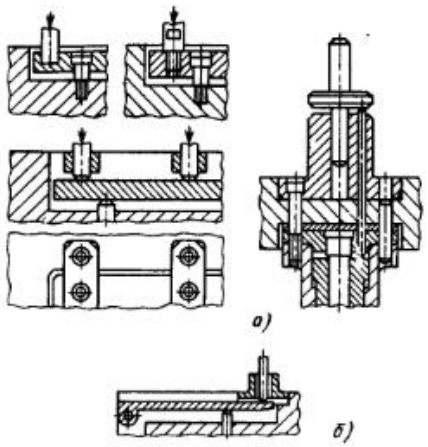


Рис. 22. Разновидности способов связи верхнего толкателя пресса со штампом

териал в процессе его перемещения для переработки.

При ручной подаче материала в съемник встраивают подпружиненный шаговый упор *7* или автоматический маятниковый (рис. 21, *б*).

Эксплуатация штампов в автоматических комплексах по аналогии со штампами для обычной вырубки с отходами, как правило, не требует применения шагового упора.

Прямая связь механического выталкивателя пресса через толкатель *5* (см. рис. 21) с выталкивателем штампа *1* может осуществляться только при совпадении центрально расположенного толкателя с центром давления штампа и при отсутствии в центре пуансона. В остальных случаях применяют промежуточную деталь — траверсу *4*, которая через шпильки *6* осуществляет связь между толкателем (толкателями) пресса и выталкивателем, расположенным в матрице штампа. Конструктивно эта связь реализуется различными способами в зависимости от формы вырубаемой детали, расположения в ней отверстий и технической характеристики пресса (рис. 22, *а*). Если центр давления выталкивателя штампа значительно отдален от центра давления механического толкателя пресса и установить связь между ними через обычную траверсу невозможно, то в некоторых случаях удается применить рычаг — траверсу, шарнирно закрепленную в верхней плите (рис. 22, *б*). Ход подвижных деталей штампа (съемники, выталкиватели и др.) ограничивается ступенчатыми втулками (см. рис. 5), закрепленными винтами, а также с помощью буртиков (фланцев), горизонтально расположенных стержней и др. (см. рис. 57, поз. *1*); ограничение с помощью ступенчатого винта (см. рис. 21, *а*) наименее надежное.

Раскрой исходного материала, предусматривающий поворот полосы (ленты) вдоль продольной оси с целью экономии материала, требует введения дополнительного разового упора *10* (см. рис. 21).

Одним из существенных дефектов, возникающих при эксплуатации штампов совмещенного действия, является прилипание вырубленных заготовок к выталкивателю *3* (рис. 23), расположенному внутри матрицы *5*. Это явление наблюдается прежде всего при штамповке деталей из тонкого металла ($s \leqslant 1$ мм), особенно при работе в автоматическом режиме. Простым и надежным средством отделения от выталкивателя прилипших заготовок является применение подпружиненных отлипателей *4* различных конструктивных исполнений. Наиболее распространенными конструкциями являются стандартизованные по ГОСТ 24532—80 и подпружиненные с шариком. Наличие в штампе механизма клещевой автоматической подачи материала *6* и ножей *1* и *2* для разделения отхода — ленты обеспечивает бесперебойную работу штампа.

Удаление вырубленных заготовок из рабочей зоны штампа после проталкивания их через матрицу осуществляется несколькими способами: при малых партиях — вручную (улавливая полосой), при больших партиях — струей сжатого воздуха или с помощью лоткового механизма пресса. Кроме того, одним из эффективных способов является запрессовка (возврат) в ленту вырубленной заготовки и вынос ее лентой из рабочей зоны. В этом случае вырубленная заготовка не удаляется со штампа непосредственно из матрицы, а при взаимодействии пружинных

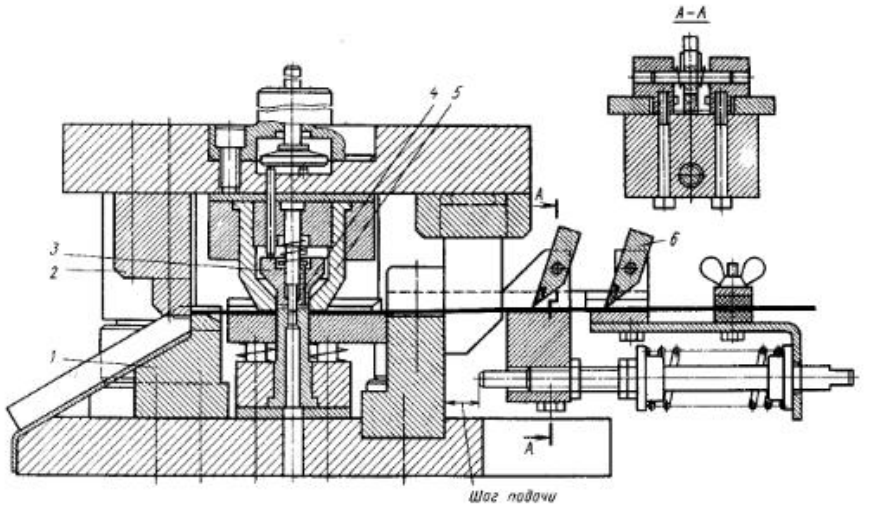


Рис. 23. Механизированный штамп совмещенного действия с отлипателем вырубленных деталей от выталкивателя

элементов съемника *1* и выталкивателя *2* возвращается (запрессовывается) обратно в ленту (рис. 24). Относительная глубина запрессовки может колебаться от $0{,}1s$ до s, что зависит от поставленной задачи с учетом способа отделения вырубленных деталей от ленты при выходе ее из рабочей зоны. В штампах для вырубки контура (без пробивки отверстий) с нижним расположением матрицы (рис. 24) заготовка запрессовывается в ленту снизу вверх, а в совмещенных штампах, когда матрица расположена вверху (рис. 25), — сверху вниз. Применение этого способа ограничено габаритами штампуемой детали (ориентировочно 200 мм) и ее толщиной (ориентировочно до 4 мм).

На рис. 25 приведена конструкция штампа совмещенного действия для вырубки шайб с применением трехрядного раскроя материала. По аналогии с конструкцией, показанной на рис. 23, штамп оснащен механизмом клещевой автоподачи. Способ удаления одновременно трех вырубленных шайб с помощью струи сжатого воздуха не является надежным, поэтому здесь применен метод запрессовки деталей в ленту — с выносом их в безопасную нерабочую зону. Кроме того, при применении метода «запрессовки» в большинстве случаев отпадает необходимость в наличии отлипателей на верхних выталкивателях. Конструктивной особенностью многорядного штампа совмещенного действия является также наличие единой траверсы *1*, через которую осуществляется передача усилия пружины *4* на все три выталкивателя *5*, расположенные в матрице. Если пресс оснащен лотковым сбрасывателем, то в качестве привода системы траверса *1* — шпильки *2* — плита *3* — выталкиватель *5* используют механический толкатель пол-

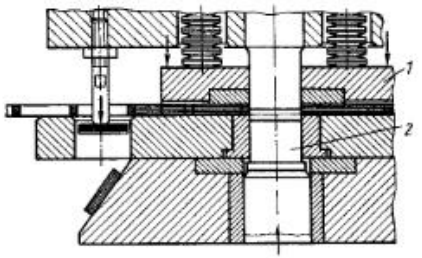


Рис. 24. Схема вырубки с возвратом детали в ленту снизу вверх

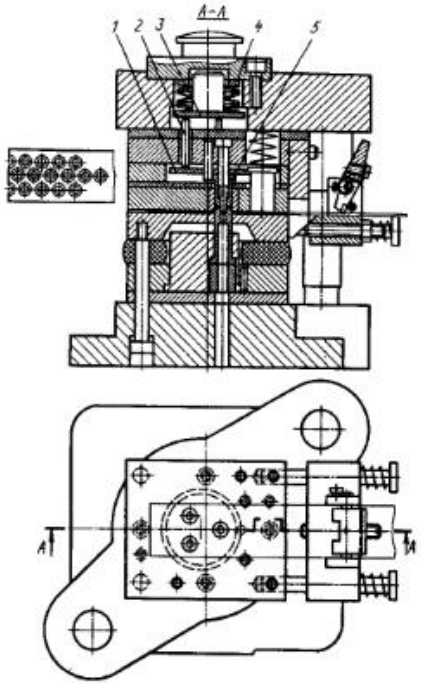


Рис. 25. Трехрядный штамп совмещенного действия с применением запрессовки вырубленных деталей (сверху вниз) в ленту

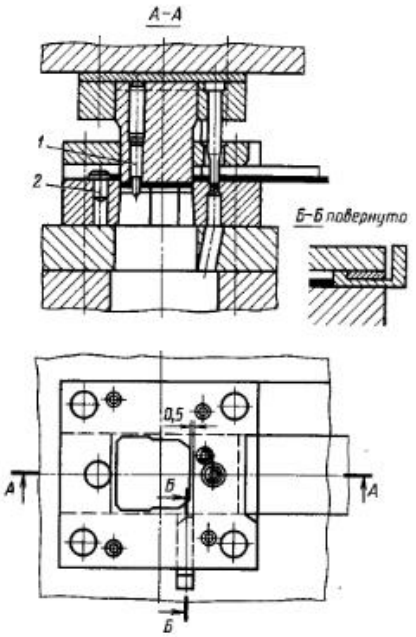


Рис. 26. Штамп для вырубки — пробивки последовательного действия (с ловителем)

зуна пресса и при толщине штампуемого материала $s \leqslant 1$ мм в выталкиватель *5* встраивают отлипатели.

Вырубку заготовок с пробивкой в них отверстий по последовательной схеме применяют преимущественно в тех случаях, когда вырубить ее в совмещенном штампе невозможно: из-за недопустимо малых стенок в пуансон-матрице; при близком расположении отверстий; когда контур детали или отверстия практически нельзя вырубить (пробить) в одном рабочем ручье за один прием. Кроме того, в последовательных штампах удобнее осуществлять многорядную штамповку с применением малоотходных процессов. Для штамповки толстолистового металла данную категорию штампов выполняют в основном с жесткими съемником, а для штамповки относительно тонкого материала применяют как жесткий, так и пружинный съемник. В отличие от совмещенной штамповки, при которой точность расположения всех элементов штампуемой детали, участвующих в разделительном процессе, зависит от степени точности их взаимного расположения в пуансон-матрице, при последовательной штамповке на качество получаемых деталей влияет не только точность взаимного расположения соответствующих элементов, но и достигаемая степень точности шага подачи материала. Поэтому при разработке конструкции штампа последовательного действия вопрос фиксации полосы (ленты) по шагу подачи является первостепенным. При наличии перемычек в полосе и подаче материала вручную (с переброской его через жесткий упор) (рис. 26) невозможно получить штампуемые заготовки с высокой точностью, если в конструкции не предусмотрены дополнительные средства фиксации полосы. Этот вопрос решается путем применения ловителей *1*, которые, фиксируя полосу по шагу,

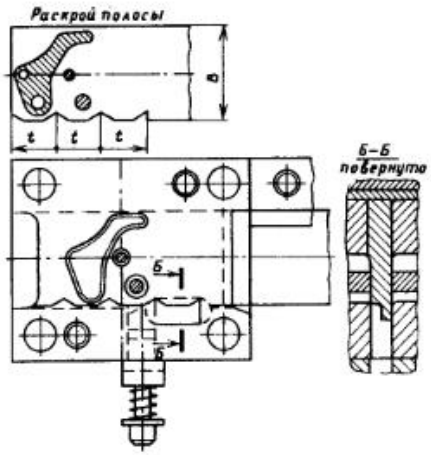


Рис. 27. Раскрой ленты и схема штампа последовательного действия для вырубки с шаговым ножом и подпружиненным упором

создают условия для получения деталей со стабильным взаимным расположением отверстий по отношению к внешнему контуру. Еще бо́льшая точность штампуемых деталей обеспечивается при наличии шаговых ножей (рис. 27 и 28). Применяемые совместно с ловителями, они гарантируют получение штампуемых деталей, не уступающих по качеству деталям, изготовленным совмещенной штамповкой. Ловители работают без напряжения, если размер шагового ножа в направлении подачи выполнен на 0,05—0,3 мм больше номинального шага подачи t (в зависимости от шага и толщины штампуемого материала); свобода действия ловителей способствует лучшей фиксации. Для полосы (ленты) шириной до 80 мм (ориентировочно) в сочетании с боковым прижимом (действующим в сторону — от ножа) достаточно одного ножа. Когда ширина полосы (ленты) $B > 80$ мм, целесообразно применять два шаговых ножа (см. рис. 28), размещая их с обеих сторон полосы (боковой прижим не требуется). Место расположения шагового ножа определяется схемой планировки рабочих позиций штампа. Главными условиями при этом являются обеспечение минимальных потерь штампуемого материала при первых ходах работы штампа и стремление избежать поломки инструмента (вследствие перекоса и набегания рабочих кромок пуансона и матрицы друг на друга), которая возможна из-за появления поперечной силы, когда контур разделения не полностью вписывается в раскрой материала. Припуск на обрезку края полосы (ленты) для шагового ножа устанавливается ведомственными нормативами.

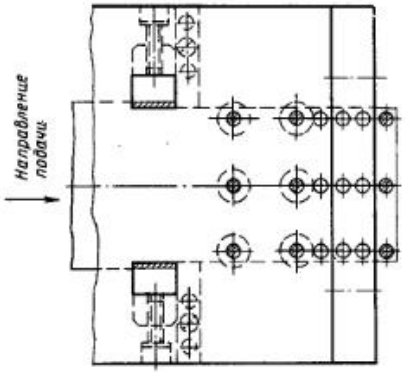
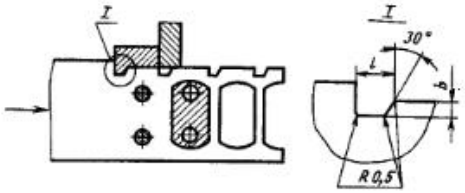


Рис. 28. Схема последовательной вырубки с применением двух шаговых ножей

Притупление режущей кромки ножа и соответствующего участка матрицы в процессе эксплуатации вызывает образование заусенца на краю полосы (ленты) перед упором, что препятствует нормальному продвижению материала вперед. При ручной подаче этот дефект требует от оператора затраты дополнительной энергии. Решить данную проблему можно двумя способами: применением ножа с усиком (табл. 3) или специального шагового ножа, работающего совместно с подпружиненным упором (см. рис. 27). Чтобы избежать лишнего расхода металла, обе конструкции целесообразно применять там, где допускается выполнять соответствующие вырезы в полосе (ленте) без дополнительного припуска по ширине. При применении штампа с автоматической подачей материала необходимость в установке специальных ножей определяется с учетом конкретных условий производства.

3. Размеры элементов шагового ножа (размеры, мм)



Толщина материала s	b	l
До 1,6 Св. 1,6 до 2,5	1,6	3,2
Св. 2,5 до 3,0 » 3,0 » 4,0	2,0	4,0

В тех случаях, когда полосу (ленту) необходимо центрировать в штампе равномерно относительно продольной оси, применяют рычажное самоцентрирующее устройство (рис. 29). В приведенной на рис. 29 конструкции оба рычага *2* монтируют на одной подпружиненной державке *4* с помощью шарнира *1*; державка фиксируется и удерживается с помощью колонок *3*, установленных в верхней плите штампа.

Процесс последовательного разделения штампуемого материала без перемычек в направлении подачи идентичен процессу отрезки заготовок без отходов (см. рис. 11 и 12) и, следовательно, может выполняться с досыланием полосы (ленты) до жесткой опоры (без переброски через шаговый упор и без применения шагового ножа). Благодаря такому методу представляется возможность производить разделение ленты (полосы) с получением одновременно двух заготовок за один ход пресса: одной напровал, а второй на отвал (рис. 30). При этом шаг подачи до упора *2* равен удвоенной ширине (длине) заготовки. Соответственно и число пуансонов для пробивки отверстий удваивается — с расположением их вдоль подачи на расстоянии шага t друг от друга. Готовые детали отталкиваются подпружиненным сбрасывателем *1*. Заметим, что метод штамповки напровал и на отвал применим также и для безотходной отрезки заготовки, не имеющей отверстий. При наличии механизма автоматической подачи ленты (полосы) процесс последовательной штамповки без перемычек может осуществляться в отсутствии

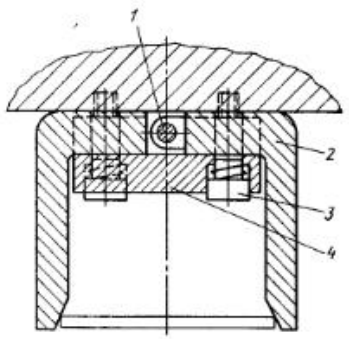


Рис. 29. Самоцентрирующее устройство для фиксации полосы (ленты)

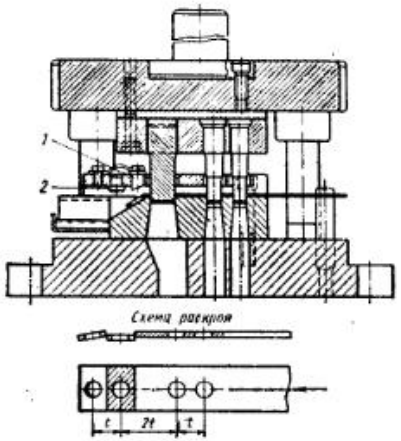


Рис. 30. Штамп для последовательной вырубки одновременно двух деталей напровал и на отвал

средств фиксации материала по шагу.

Разработаны различные варианты конструкций штампов для пробивки отверстий в полуфабрикатах: с жестким и пружинным съемником. Детали (заготовки) из относительно тонких материалов ($s < 3$ мм) после пробивки можно снимать с пуансонов тремя способами: пружинным, жестким или полужестким съемником (рис. 31). При съеме штампуемой заготовки с пуансонов *4* полужесткий съемник опирается в головки винтов *1* и, следовательно, в принципе работает как жесткий съемник. При сближении верха с низом штампа державка *2*, касаясь съемника *3*, опускает его на некоторое расстояние без соприкосновения со штампуемой деталью. После выполнения рабочего хода съемник возвращается в исходное положение — до головок винтов, образуя увеличенную щель высотой примерно $h_1 + 2s$, удобную для загрузки заготовок. Такая схема предоставляет возможность уменьшить длину пуансонов на величину хода съемника h_1.

Для металла толщиной не менее 3 мм применяют штампы преимущественно с жестким или полужестким съемником. В целях безопасности и повышения производительности труда жесткие и полужесткие съемники целесообразно оснащать щелчковыми сбрасывателями *2* (рис. 32), которые с помощью пружины *1* выталкивают готовую деталь из рабочей зоны после съема с пуансонов. В профильном прокате пробивка отверстий осуществляется преимущественно с жестким съемником.

Пробивку отверстий в стенках полых деталей производят в основном при фиксации внутренней полости детали. При наличии на поверхности детали нескольких отверстий их пробивают раздельно — с фиксацией на стенки полученных отверстий, а если конструктивно возможно, то одновременно пробивают все отверстия или группами. На рис. 33 приведена конструкция штампа для пробивки трех отверстий в изогнутой детали. Подпружиненные пуансоны *1* и *2*, расположенные под углом, смонтированы в прижиме *4*, который при рабочем ходе, достигнув поверхности штампуемой детали, на-

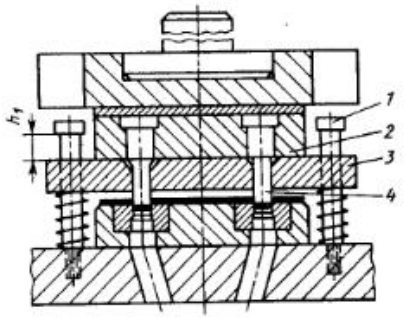


Рис. 31. Пробивка отверстий в штампе с полужестким съемником

ходится в неподвижном состоянии до тех пор, пока пуансоны *1* и *2* при воздействии на них плиты *3* (с клиновидными выступами) не выполнят пробивку. Съем готовой детали осуществляется тарельчатыми пружинами с усилием, превышающим необходимое усилие для съема материала с пуансонов. Обязательным условием работоспособности штампа является применение ограничителей *5* закрытой высоты, обеспечивающих высокоточное совпадение осей пуансонов и матриц.

Более надежно обеспечивается совпадение рабочих частей, расположенных относительно друг друга под некоторым углом α, в конструкции, схема

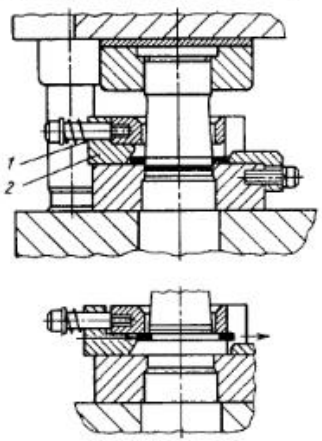


Рис. 32. Схема работы щелчкового сбрасывателя в пробивном штампе

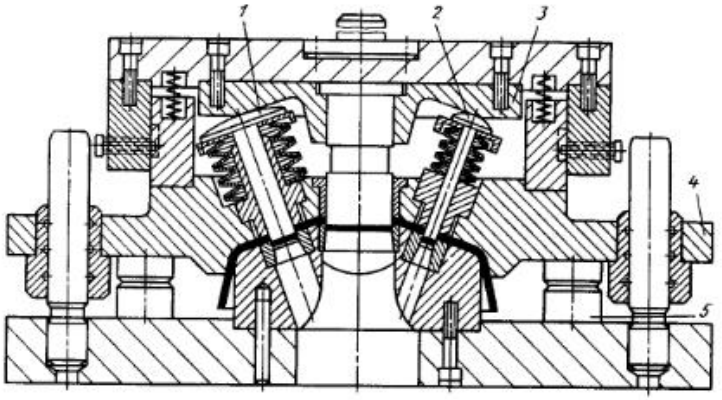


Рис. 33. Пробивка отверстий, расположенных под углом, в штампе с пуансонами, встроенными в прижиме

которой показана на рис. 34. Пуансон *3* устанавливается на ползушке *1*, смонтированной в верхней части, а пуансон *4* — на ползушке *2*, размещенной в нижней части штампа. Рабочий ход обеих ползушек осуществляется от одного клина *5*, жестко закрепленного к нижней плите. При этом обязательным условием является строгое совпадение угла наклона поверхностей *А* и *Б* (клина и противоотжима) с углом наклона пуансона (пуансонов) *3*.

Для изготовления деталей типа тел вращения с отверстиями, равномерно расположенными по контуру сечения

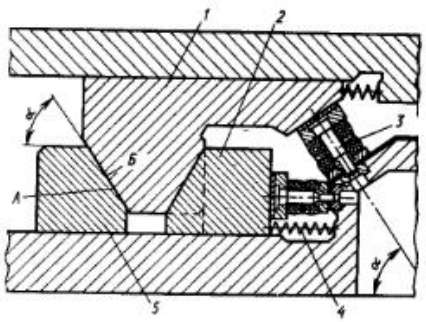


Рис. 34. Пробивка отверстий, расположенных под углом, в штампе с пуансонами, прикрепленными к ползушкам

поверхности, применяют штампы с поворотным механизмом (рис. 35).

Отверстия в скобообразных деталях можно пробивать двумя способами: с применением клиновых механизмов и путем «сквозной прошивки» пуансонами *1* и *2* удлиненной формы (рис. 36, *а*). Учитывая, что после пробивки могут образоваться заусенцы, необходимо предусматривать принудительный съем детали с верхней матрицы *3* (рис. 36, *а*) (в приведенной на рис. 36, *а* конструкции механизм для съема деталей не показан). Сквозная пробивка отверстий одновременно в двух полках скобообразной детали возможна также при наличии двух жестко закрепленных матриц *1* и *2* (рис. 36, *б*). Максимальное усилие съема Q_{max} определяют исходя из потребного усилия для среза заусенца, наибольшая толщина которого равна $z_{max} + r$;

$$Q_{max} = 1{,}25L\,(z_{max} + r)\,\sigma_{сд},$$

где L — суммарная длина периметра пробиваемых отверстий (с обеих сторон); z_{max} — максимальная величина зазора; $r = (0{,}1 \div 0{,}3)\,s$ — величина возможного притупления режущей кромки матрицы; s — толщина штампуемого материала; $\sigma_{сд}$ — напряжение сдвига.

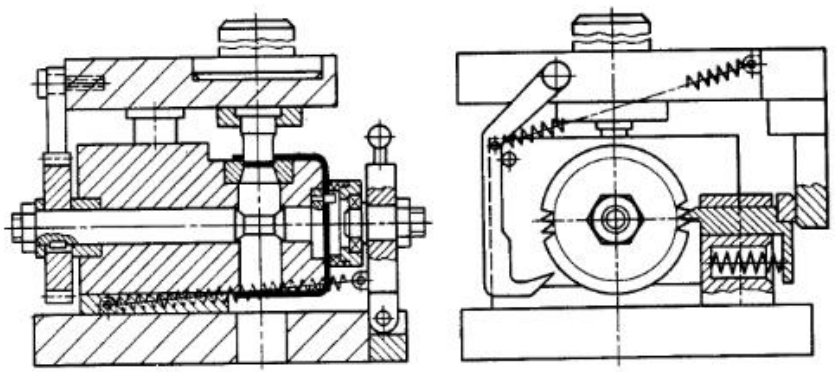


Рис. 35. Штамп с поворотным механизмом для пробивки отверстий в цилиндрической детали

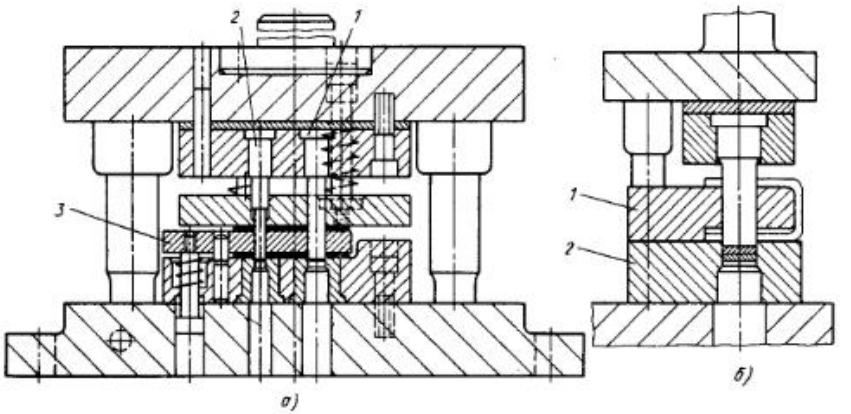


Рис. 36. Сквозная пробивка отверстий одновременно в двух полках детали

Отверстия в трубах целесообразно пробивать в штампах, оснащенных подпружиненной оправкой (рис. 37).

Обрезку края (припуска) по периметру коробки (любой конфигурации) после операции вытяжки выполняют в специальном штампе, одна рабочая часть которого совершает возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном к оси ползуна пресса. Наиболее распространенной является конструкция с подвижной матрицей *1* (рис. 38). Пуансон *4* жестко прикреплен к верхней плите. Державка *5* с матрицей *1* и прижимом *2* может перемещаться в горизонтальной плоскости на величину z. Это достигается благодаря наличию на боковой поверхности державки специального профиля, согласованного с профилем кулачков *6*. Таким обра-

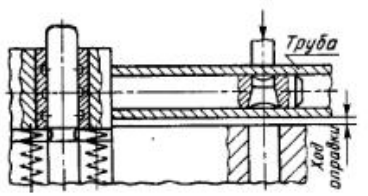


Рис. 37. Пробивка отверстий в трубе с применением подпружиненной матрицы-оправки

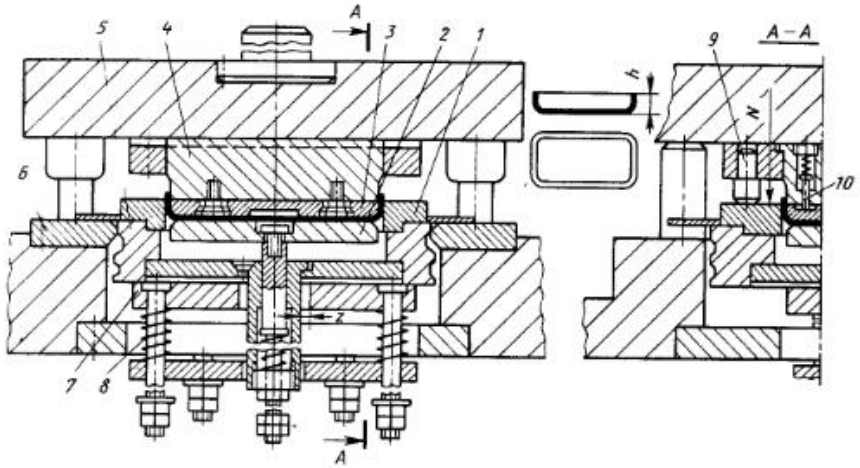


Рис. 38. Штамп для обрезки края вертикальных стенок коробок

зом, при опусканнн и подъеме ползуна пресса происходит необходимый сдвиг всей системы с матрицей относительно пуансона в горизонтальной плоскости одновременно по двум направлениям: справа налево (или наоборот) и спереди назад (и наоборот). При взаимодействии режущих кромок пуансона и матрицы осуществляется разделительный процесс, в результате чего неровный край коробки отделяется. Возвращение подвижной системы в исходное положение выполняют пружины *8* через плиту *7*. Ограничители *9* и фиксатор *3* контролируют полученные размера h — высоты коробки. Для съема готовой детали с фиксатора предусмотрены отлипатели *10*. В процессе резания возникает отжимающая сила N, которой противодействует суммарное усилие Q пружин *8*. Усилие определяют по формуле

$$Q = 0{,}35\,\frac{L}{2}\,\sigma_{сд} s,$$

где L — общая длина периметра коробки.

Вырезку участка стенки полой детали осуществляют в штампе, оснащенном специальными пуансонами-ножами *2* (рис. 39). Обрабатываемую деталь надевают на матрицу *4*, которая имеет соответствующий срез, расположенный в горизонтальной плоскости. Ножи *2* закреплены в ползушках *3*. Последние от клиньев *1* перемещаются возвратно-поступательно, осуществляя рабочий ход при их сближении. В результате взаимодействия режущих кромок матрицы и ножей происходит скол материала с образованием бесформенного отхода. В целях предотвращения преждевременного притупления режущих кромок ножей, они не должны доходить друг до друга на расстояние $(0{,}1—0{,}2)\,s$. Эффективность работы штампа во многом зависит от стойкости ножей, угол резания которых не превышает 15°, поэтому материал для их изготовления должен быть высокопрочным и нехрупким (твердость закалки в пределах $HRC_э$ 48—54). Рекомендуемая толщина штампуемого материала $s \leqslant 1$ мм.

Частичную обрезку плоской заготовки (например, по углам) обычно производят в универсально-переналаживаемых штампах при малых партиях штампуемых деталей (в мелкосерийном или единичном производстве). Заготовку фиксируют преимущественно по двум сторонам (рис. 40) с помощью регулируемых линеек *6*. Процесс резания пуансоном *2* и матрицей *4*

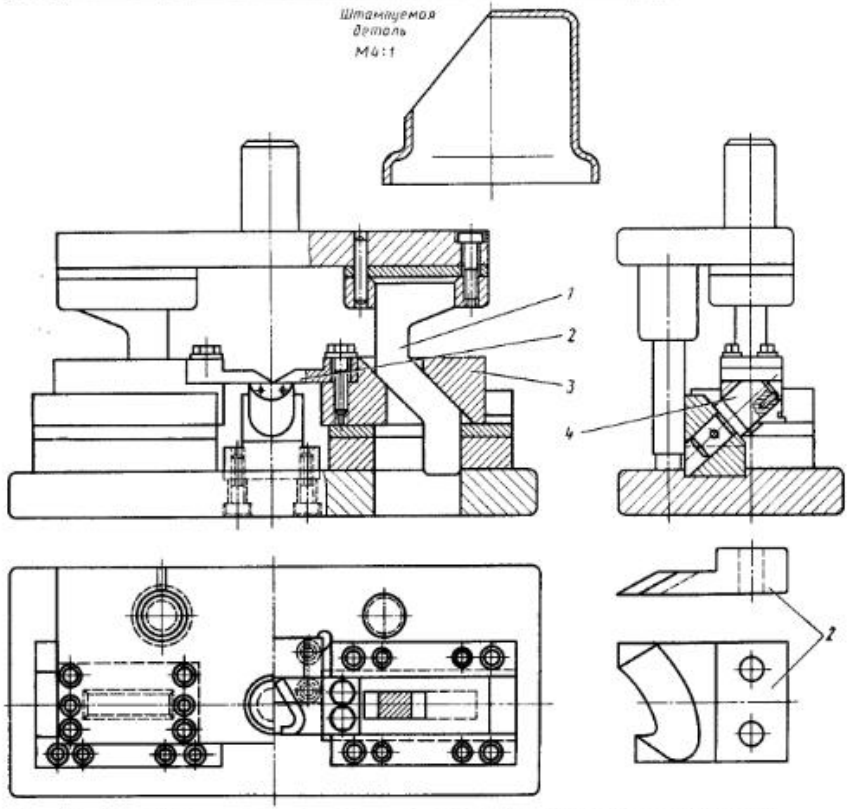


Рис. 39. Конструкция штампа для снятия лысок на поверхности полой детали

осуществляется при наличии двух противоотжимов *5* и прижимов *1* и *3*.

Штампы для обрезки по контуру детали или в сочетании с пробивкой отверстий (совмещенная штамповка) широко применяют для деталей, прошедших формоизменяющие операции. Распространенный способ фиксации — по отформованной поверхности заготовки. Отход по периметру после обрезки может сниматься с пуансона (пуансон-матрицы) пружинным съемником или разделяться ножами (рис. 41) на несколько частей с последующим удалением одним из известных способов.

Вырубку тонколистовых деталей без отверстий или с отверстиями можно производить в штампах, у которых рабочие части внешнего контура частично или полностью изготавливают из стальной ленты *1* толщиной $s = 2 \div 3$ мм (рис. 42). Последние прикрепляют к державкам *2* и *3*, выполненным из неметаллических легко обрабатываемых материалов (типа ДСП или текстолита). Толщина штампуемого металла до 2 мм. Стальную ленту прикрепляют к ДСП вертикально (на ребро) и горизонтально эпоксидным клеем и винтами. Например, горизонтально — в верхней части штампа, а вертикально — в нижней (рис. 42, *а*). При таком расположении облегчается пригонка режущих частей. Горизонтальное расположение стальной ленты особенно целесообразно при обрезке деталей с криволинейным фланцем. Для пробивки мелких отверстий, а

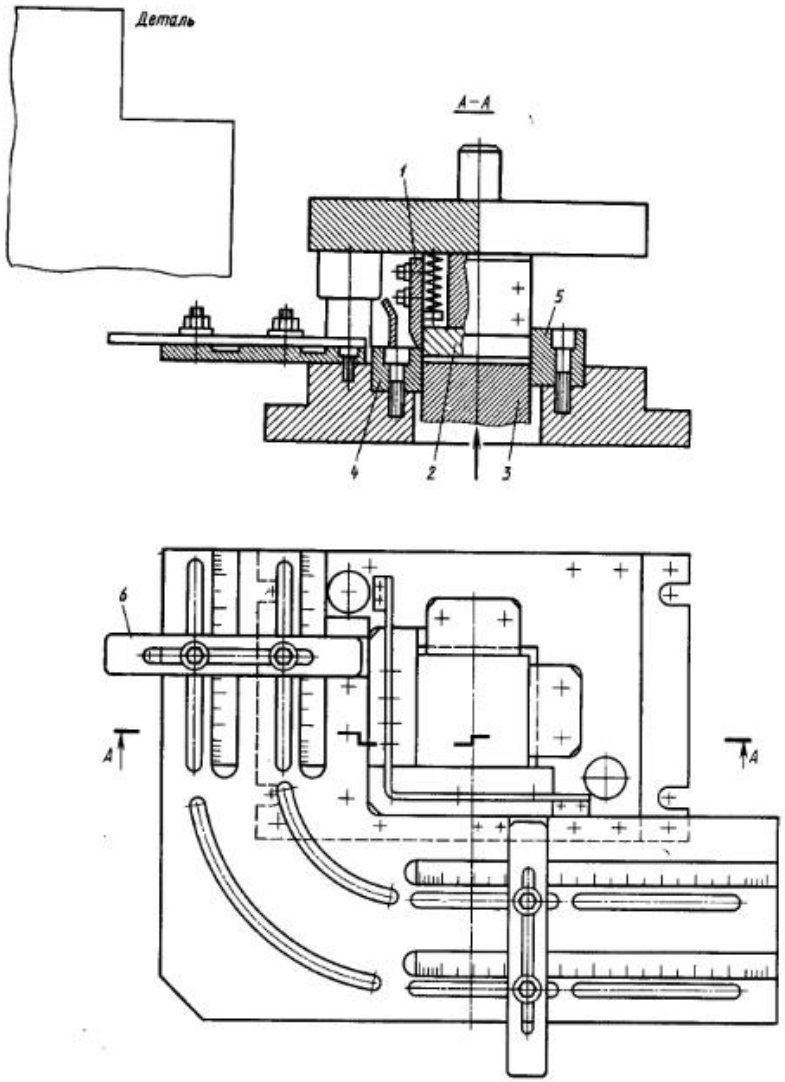


Рис. 40. Универсально-переналаживаемый штамп для обрезки угла в заготовке

также во всех случаях, когда возникают трудности с установкой стальной ленты, одновременно применяют обычные пуансоны и матрицы (см. рис. 42, *а* и *б*). Такие штампы пригодны прежде всего для мелкосерийного производства, однако практикой установлено, что они рентабельны и при крупных сериях штампуемых деталей.

Наиболее прогрессивным направлением в разделительных процессах холодной листовой штамповки является высокоточная **чистовая вырубка — пробивка** на штампах, обеспечивающих обжатие металла вдоль линии резания клиновидным ребром (см. рис. 43 и 44). Для штампуемого металла толщиной $s \leqslant 4$ мм клиновидное ребро применяют только на прижиме; для $s > 4$ мм — на прижиме и на матрице. Высота h клиновидного ребра и расстояние a до его вершины от рабочего окна матрицы зависят от толщины штампуемого материала. Соответствующие рекомендации приведены в табл. 4.

Для чистовой вырубки — пробивки применяют преимущественно штампы совмещенного и последовательного дей-

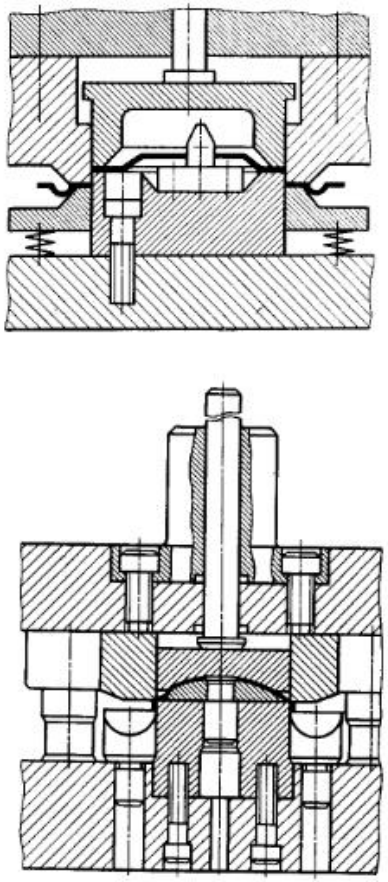


Рис. 41. Схемы штампов для обрезки ранее отформованных заготовок

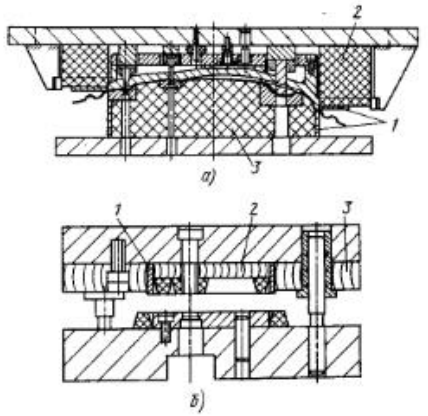


Рис. 42. Штампы совмещенного действия с применением рабочих частей, выполненных из стальной ленты

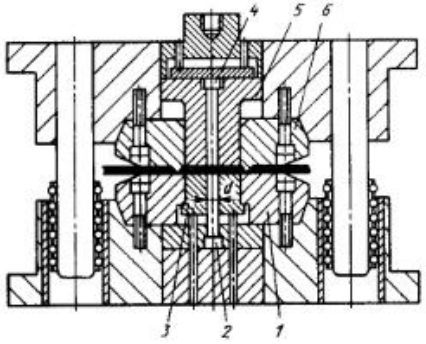


Рис. 43. Штамп для чистовой вырубки с конической посадкой рабочих частей

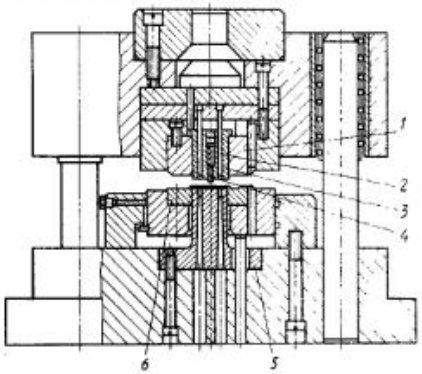
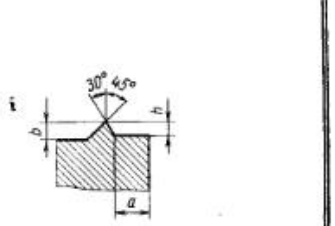
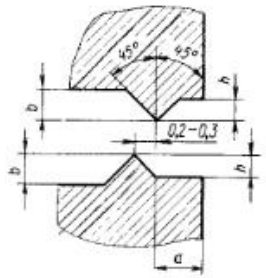


Рис. 44. Штамп для чистовой вырубки с цилиндрической посадкой рабочих частей

4. Форма и размеры клинового ребра (размеры, мм)





s	h	a	b	s	h	a	b
0,5	0,2	0,5	0,25	4,5	0,5	3,2	0,55
1,0	0,3	0,7	0,35	5,0	0,55	3,7	0,6
2,0	0,4	1,4	0,45	6,0	0,6	4,2	0,65
3,0	0,45	2,1	0,5	8,0	0,7	5,0	0,75
4,0	0,5	2,8	0,55	10	0,85	6,0	0,9

ствия и прессы специального назначения. Процесс осуществляется с малым зазором между пуансоном и матрицей независимо от толщины штампуемого материала (см. гл. 2, § 3), поэтому направляющими элементами служат шарнковые узлы. Повышенные требования по точности изготовления предъявляются ко всем рабочим деталям и узлам. Например, пригоика подвижных деталей ограничивается посадкой $H6/q5$. При компоновке рабочих деталей с монтажными плитами применяют два способа соединений: с применением конической посадки, приведенной на рис. 43, и цилиндрической посадки, показанной на рис. 44. Рекомендуемые углы и натяги при выполнении конического соединения даны в табл. 11. Исходный материал (лента, полоса) защемляется между матрицей *1* и прижимом *6* с усилием, необходимым для формирования клинового ребра. Штампуемая деталь в процессе вырубки прижимается между выталкивателем *3* и пуансон-матрицей *5*. Отделяемый отход во время пробивки отверстня (отверстий) зажимается между выталкивателем *4* и пуансоном *2*. При $d_{отв} \leqslant s$ выталкиватель-прижим для отходов можно не применять (см. рис. 44). После завершения процесса вырубки—пробивки готовая деталь возвращается противодавлением из матрицы и автоматически (струей сжатого воздуха или механизмом) удаляется от штампа. Аналогичио удаляются и те отходы, которые защемляются в процессе пробивки отверстий.

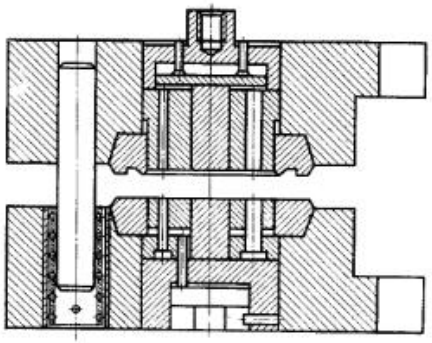


Рис. 45. Штамп для чистовой вырубки закрепленный за универсальным прессом прошедшим модеризацию

При отсутствии специального оборудования чистовая вырубка—пробивка выполняется на универсальных

модернизнрованных прессах. Типовая конструкция соответствующего штампа приведена на рис. 45. Массивные несущие плиты обеспечивают необходимую жесткость всей конструкцни, что в сочетании с шариковыми направляющими способствует выполнению высококачественной компоновки рабочих частей (см. т. 1).

Точные разделительные операции можно выполнять и на универсальном прессовом оборудовании без модернизации с применением в штампах прижимных устройств. Однако качество среза на торцах штампуемых деталей не может конкурировать с результатами, которые достигаются на специальном оборудовании. Это объясняется недостаточным усилием пружинных прижимов. По ориентировочным данным, для обеспечения высокого качества штампуемых деталей исходную заготовку (ленту, полосу) необходимо прижимать в зоне клинового ребра с усилием 25 % усилия вырубки ($P_{рез}$), а деталь и отходы соответственно с усилием 15—20 % от $P_{рез}$, что достичь полностью простыми средствами практически невозможно.

Зазоры между матрицей и пуансоном (см. гл. 2, рис. 35) назначают так, чтобы ие нарушался размер штампуемой детали. Прн вырубке наружного контура форма и размер детали получаются по матрице, поэтому режущий зазор выполняется за счет уменьшения размеров пуансона. Размеры отверстия в детали получаются по пуансону и, следовательно, зазор выполняется за счёт увеличения размеров рабочего окна матрицы.

Штампы для зачистки торцов вырубленных заготовок применяют при отсутствии специального оборудования для чистовой вырубки. Конструкции соответствующих штампов отличаются компактностью и простотой, но к ним предъявляются повышенные требования по точности изготовления рабочих частей и направляющих элемеитов. Сущность процесса зачистки торца вырубленных деталей заключается в проведении дополнительной разделительной операции с ограниченным снятием слоя металла по наружному контуру яли по периметру отверстия — в виде тонкой стружки (размеры припусков на зачистку см. гл. 2 с. 38). Зачистка может быть однократная и многократная.

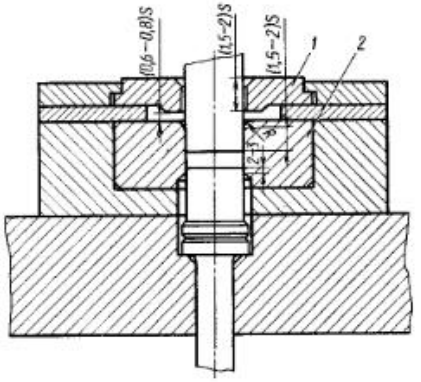


Рис. 46. Схема штампа для зачистки контура заготовки

На рис. 46 показаи разрез штампа для однократной зачистки. Заготовка после вырубки укладывается в фиксатор-трафарет *1*, устанавливаемый с высокой точностью относительно рабочего окна матрицы *2*. Для обеспечения безопасности в работе целесообразно выполнять фиксатор выдвижным, с механическим приводом. Материал матрицы должен нметь высокую твердость, что предохранит ее от налипания и задиров, а также способствует высокой стойкости инструмента.

Рабочую кромку матрицы зачистиых штампов выполияют в двух исполнениях: острой и притупленной, что зависит от рода штампуемого материала. Например, для латуни и других металлов, не способных к прилипанию, лучше применять острую кромку, а для сталей и алюминия — притупленную. Взаимосвязь пуансона с матрицей осуществляется в двух исполиениях: с возможностью захода пуансона в матрицу при иаличии зазора не более 0,01—0,02 мм и без захода — с превышением размеров сечения пуансона по отношению к матрице на величину двустороннего припуска на зачистку (т. е. размер пуансона соответствует размеру заготовки после вырубки). В этом случае во время работы пуансон не доходит до «зеркала» матрицы на

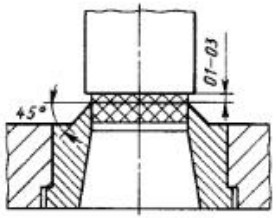


Рис. 47. Схема зачистки детали из неметаллических материалов

0,1—0,3 мм. Детали для неметаллических материалов (например, из гетинакса и текстолита) зачищаются в матрице заостренной режущей кромкой (рис. 47), а пуансон выполняется по второму варианту, т. е. с сечением, перекрывающим рабочее окно матрицы, и также в процессе резания не доходит до ее режущей кромки на 0,1—0,3 мм. Если штамп для зачистки прикрепляют к ползуну пресса с помощью хвостовика и пресс не обеспечивает необходимой точности для совпадения рабочих частей верха с низом штампа, то хвостовик по конструкции должен быть плавающим (см. рис. 8; 49). Пригонка колонок с втулками направляющими осуществляется по $H6/h5$ или $H6/q5$ и в некоторых случаях с индивидуальной доводкой. Лучший результат дают направляющие шариковые узлы (с трением качения). Штампуемую заготовку укладывают в штамп уширенной стороной (без скола) к матрице. Удаление стружки

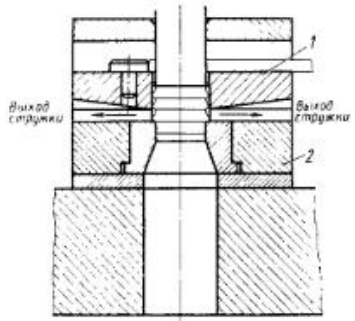


Рис. 48. Схема вырубки и зачистки детали в двухъярусном штампе

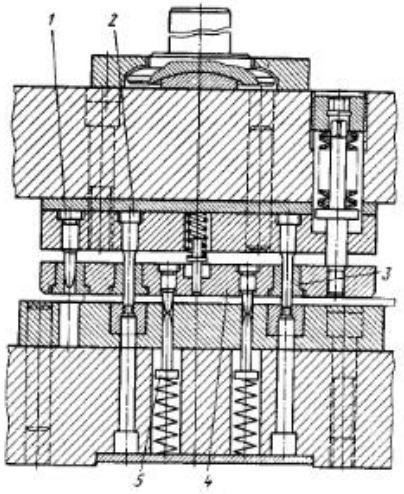


Рис. 49. Зачистка в штампе ранее пробитых отверстий

после зачистки деталей наиболее целесообразно выполнять с помощью струи сжатого воздуха.

Детали с чистыми торцами можно получить в двухъярусном штампе (рис. 48), верхняя матрица *1* которого имеет острую режущую кромку и служит для обычной вырубки заготовки с учетом припуска на зачистку, а нижняя *2* — с закругленной рабочей кромкой, предназначенной для зачистки.

В штампах для зачистки отверстий помимо направляющих колонок, втулок, выполняемых с жесткими требованиями по аналогии с зачисткой наружного контура, необходима высокоточная взаимная фиксация трех основных элементов конструкции: матрицы (державки матрицы) — съемника — державки пуансонов. Это обеспечивается за счет применения пилонов *1*, *2* и фиксаторов (рис. 49). Последние могут быть использованы одновременно для фиксации штампуемых заготовок, отверстия в которых выполняют заранее. Кроме того, применяют дублирующие фиксаторы *5*. Показанный вариант взаимной фиксации основных узлов штампа является достаточно распространенным, а наиболее универсально этот важный вопрос решается путем использования направляющих колонок штампа для одновременной фиксации съемника (см. рис. 8). При любой компоновке пуансоны в штампах для зачистки отверстий должны строго направляться по съемнику *4* через втулки *3*, изготовленные из материала с высокой твердостью. Эффективность работы штампа во многом зависит от стойкости пуансонов, которые наиболее целесообразно изготавливать из твердого сплава (типа ВК15М).

Получать высокоточные отверстия возможно не только зачисткой (снятием стружки), но и путем выглаживания с помощью дорна. Процесс выглаживания выполняется преимущественно при толщине штампуемого материала $s > 3$ мм. Инструментом для выглаживания поверхности отверстия служат специальные дорны-пуансоны или шарики (рис. 50). Припуск на выглаживание назначают на 30—40 % меньше по сравнению с припуском на зачистку со снятием стружки, поэтому соответствующие отверстия предварительно обрабатывают механическим путем. Съем штампуемой заготовки с пуансонов после зачистки рекомендуется осуществлять пружинным съемником *4* (см. рис. 49), который одновременно выполняет функции прижима материала, что существенно помогает ведению процесса. Отсутствие зазора (щели) между съемником и материалом по этой схеме предохраняет пуансоны от продольного изгиба.

Получение отверстий с чистой поверхностью среза (без заметного скола) возможно с применением пуансонов со специальной геометрией рабочей части (рис. 51). Процесс ведется в два этапа: пробивка с припуском для зачистки и соответственно зачистка. Это достигается за счет наличия на рабочем участке пуансона двух ступеней. Первую ступень, прилегающую к торцу по диаметру d_1, выполняют меньше размеров заданного отверстия детали на величину припуска для зачистки (по всему контуру). Вторая ступень имеет размер d с учетом припуска на упругую деформацию штампуемого металла. Переход размера d_1 к размеру d выполняют в виде усеченного конуса или обычной ступенью. Допускается

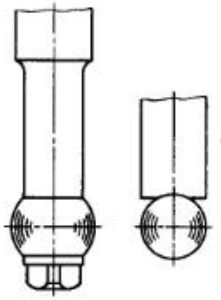


Рис. 50. Элементы рабочих частей для выглаживания ранее пробитых отверстий

изготовление пуансона с заостренным концом с углом $\alpha = 60 \div 90°$. Однако для обеспечения высокого качества поверхности стенок отверстия необходимо наличие сильного прижима штампуемого материала с давлением не менее 1—2 МПа.

При всех способах зачистки контура штампуемой детали процесс сопровождается проталкиванием ее с большим напряжением через матрицу. Появляется остаточная деформация, в результате которой полученные размеры детали не могут точно соответствовать размерам матрицы. Величина остаточной деформации зависит от марки материала и размеров штампуемой детали, конструкции режущей кромки (с притуплением или без него). Численное значение отклонений устанавливается опытным путем и колеблется в пределах тысячных и сотых долей миллиметра.

Прошедшие зачистку отверстия в листовых деталях, как правило, также имеют соответствующие отклонения размеров от упругих сил деформации.

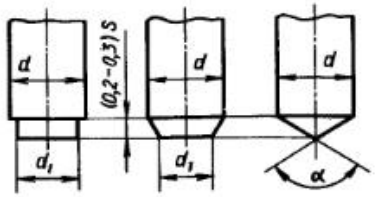


Рис. 51. Пуансоны со специальной геометрией рабочих частей для выполнения чистовой пробивки

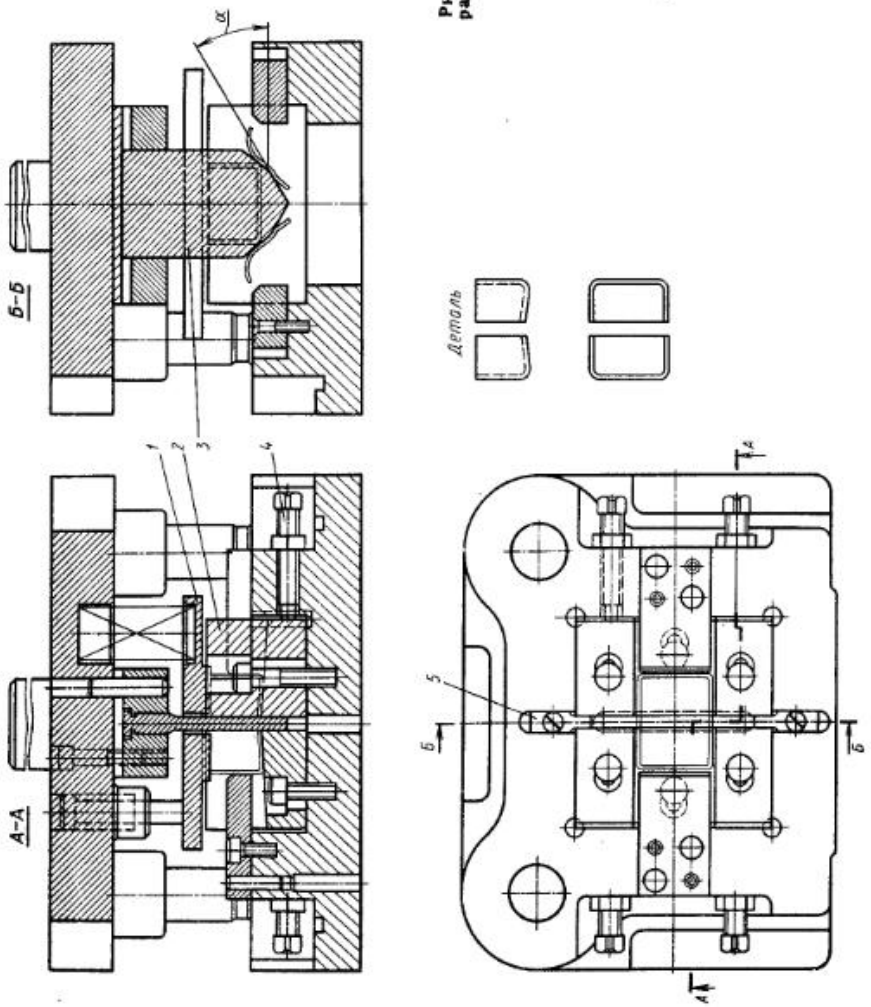


Рис. 52. Штамп для разрезки ранее вытянутой детали

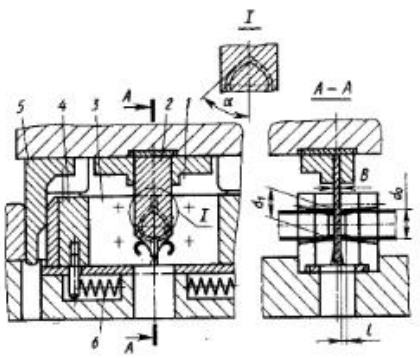


Рис. 53. Схема штампа для разрезки круглой трубы

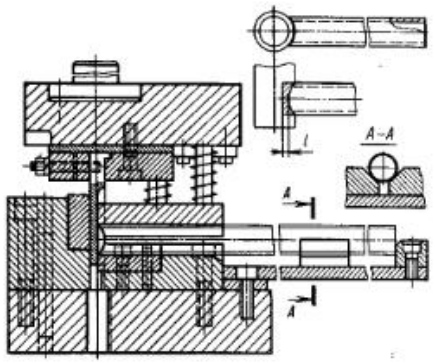


Рис. 54. Штамп для обрезки конца трубы

Штампы для разрезки спаренных деталей (обычно после формоизменяющих операций) выполняют с пружинным прижимом *1* (рис. 52).

В большинстве случаев целесообразно, чтобы матрица *2* состояла из двух регулируемых частей, прикрепляемых непосредственно к нижней плите или к промежуточной державке. Этот способ делает возможным сохранение остроты режущих кромок за счет перешлифовки торцов секций матриц без нарушения геометрии ее профиля. Наличие ограничительных упоров *5* и регулировочных винтов *4* обеспечивает высокоточную стыковку матрицы с пуансоном *3*. Геометрия ножа-пуансона должна быть такой, чтобы процесс разрезки осуществлялся с возможностью свободного отделения отхода в виде стружки. Рекомендуемый угол α между касательной, проходящей через точку касания режущей кромки пуансона со штампуемым материалом, должен быть не менее 30°

Тонколистовой прокат с замкнутой полостью в виде труб (круглого, прямоугольного и другого сечения) также возможно разделять в штампах без оправки. Однако относительно малая жесткость подобных профилей в свободном состоянии требует создания специальных условий для ведения процесса. На рис. 53 показана принципиальная схема штампа для разрезки круглой трубы с отходом, равным ширине B пуансона *2*. Составные матрицы *1* и *3* смонтированы в ползушках *4* с приводом от клиньев *5* и пружин *6*. Качество разрезки значительно повышается, если сходящиеся секции *1* и *3* производят обжим трубы с перемещением некоторого объема металла вверх навстречу пуансону *2*. С этой целью в секциях делают фаски под углом $\alpha = 45 \div 60°$. Местное выпучивание придает трубе дополнительную жесткость. Величину фаски и степень обжатия $(d_0 - d_1)/d_0 \leqslant 0{,}02$ уточняют опытным путем при отладке штампа. Обжим трубы осуществляется только на небольшом участке $l \approx \approx 3 \div 5$ мм.

Обрезка конца трубы, свариваемой с другой трубой (или иной деталью), по аналогии с операцией разделения трубы на части также требует применения заостренного пуансона и надежного прижима трубы. Обрезка трубы по заданному профилю возможна с оправкой — матрицей, размещенной внутри нее, и без оправки. В последнем случае задача осложняется тем, что стенка трубы при внедрении в нее пуансона теряет устойчивость, поэтому процесс резания следует вести начиная с боковой поверхности, постепенно приближаясь к середине трубы, имитируя схему работы ножниц с наклонными ножами. При этом трубу укладывают в штамп (рис. 54), в положение, перпендикулярное направлению оси свариваемой с нею трубы (или иной детали), т. е. с поворотом ее на угол 90° (что не соответствует тому поло-

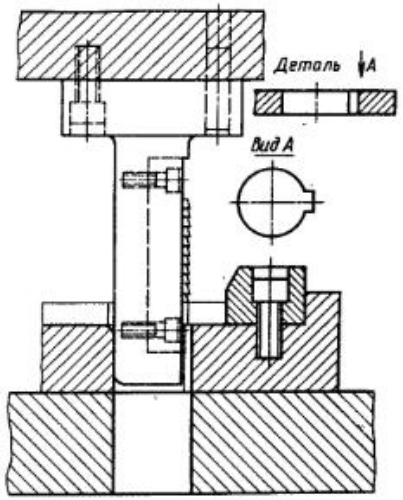


Рис. 55. Схема протягивания шпоночного паза в штампе

женню трубы, при котором она должна располагаться, если бы ее конец подвергался фрезерованию на вертикально-фрезерном станке). Это дает существенное преимущество для ведения процесса, так как представляется возможность начинать обрезку без внедрения заостренного конца пуансона в верхнюю часть стенки трубы или с началом внедрения на крайнем участке l малой длины (от торца на расстоянии $l \approx 0{,}2s$). В результате в первый момент резания стенка трубы испытывает малое усилие, что предотвращает ее прогиб. Отход, отделяясь постепенно, образует завивающуюся стружку.

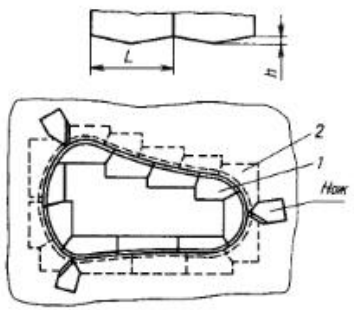


Рис. 56. Расположение секций пуансонов относительно секции матрицы

Штампы с применением протяжек подобно оснастке, выполняющей протяжные операции при механической обработке, применяют для получения шпоночных пазов и фасонных канавок; шероховатость поверхности $Ra = 0{,}8 \div 0{,}1$ мкм. В протяжке-пуансоне возрастание размера последующего зуба по отношению к предыдущему назначают в пределах 0,02—0,15 мм. Поскольку процесс резания происходит односторонне, то держатель протяжки должен иметь надежную опору. Последней может служить противоположная сторона отверстия матрицы (рис. 55) или специальный противоотжим. Штампы для протяжки отверстия (отверстий) оснащают высокоточными направляющими элементами, которые обеспечивают посадку между колонкой и втулкой не ниже $H6/q5$.

Штампы для выполнения различных разделительных операций при штамповке крупногабаритных кузовных деталей имеют свою специфику. Операции вырубки и обрезки по контуру характеризуются прежде всего наличием больших периметров режущих контуров, что требует применения секционных рабочих частей (рис. 56). Стыки секций пуансона *1* не должны совпадать со стыками секций матрицы *2*. При выполнении разделительных операций, связанных с обработкой штучных заготовок, рекомендуется, чтобы штампуемая деталь во время обработки находилась в неподвижности. Поэтому в штампах для вырубки и обрезки контура матрицу располагают вверху, а пуансон или пуансон-матрицу — внизу. Вырубленная заготовка или деталь после обрезки удерживается в исходном (нижнем) положении с помощью пружин. Учитывая большую массу литых деталей, целесообразно верхний выталкиватель *3* фиксировать ограничителем хода *1* и направляющими колонками *2* (рис. 57). Пружины *4* в крупных штампах собраны в пакеты с предварительным натягом.

Если вырубка по контуру или отрезка без отхода осуществляется из широкого рулона в раскройной линии, то заготовки проталкиваются вниз и конвейером выносятся из рабочей зоны штампа. Пробивку производят по обычной схеме — с матрицами (матрицей), расположенными внизу, и со съемом заготовки (детали) с пуансонов от пружинного съемника.

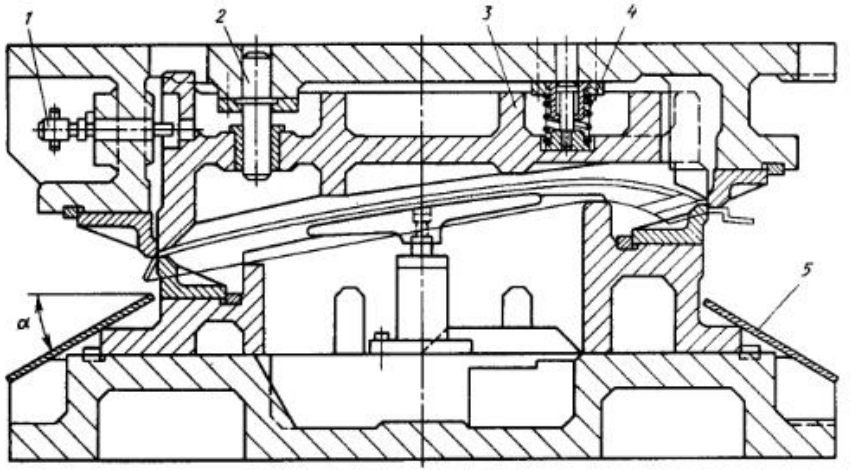


Рис. 57. Типовая компоновка основных деталей крупногабаритных разделительных штампов

Внешний отход (в виде рамки, кольца) после обрезки штучной заготовки (детали) разделяется на отрезки ограниченной длины (в пределах 400—600 мм). С этой целью по периметру обрезки устанавливают ножи (см. рис. 56), которые прижимают к секциям пуансона (пуансон-матрицы). Разделенные отходы сползают под действием собственной тяжести по наклонным плоскостям нижней плиты или по лоткам *5* (рис. 57). Угол наклона от горизонтальной плоскости $\alpha = 20 \div 30°$. Если же поверхность соответствующего склиза оснащена шариками или роликами (рис. 58), то угол наклона может быть уменьшен вдвое.

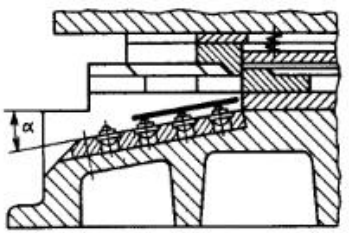


Рис. 58. Примеры конструкций лотков-склизов с трением качения

Для снижения шума и потребного усилия резания секции большого контура выполняют волнообразными (см. рис. 56). Границы волн и разъема секций должны совпадать. Высоту h волн (скосов) принимают в зависимости от толщины штампуемого материала (размеры, мм):

s	До 2	Св. 2 до 4
h	4—6	5—8
s	Св. 4 до 8	Св. 8
h	8—10	12—20

Длина волн (ориентировочно) $L = 200 \div 400$ мм, что соответствует средней длине секций.

Во всех разделительных крупногабаритных штампах устанавливают не менее трех ограничителей закрытой высоты (ОЗВ), которые контролируют величину заглубления пуансона в матрицу и разгружают пружины выталкивателя в период хранения штампа. Последнее более целесообразно осуществлять с применением ступенчатых ОЗВ (рис. 59). Их преимущество заключается в том, что они

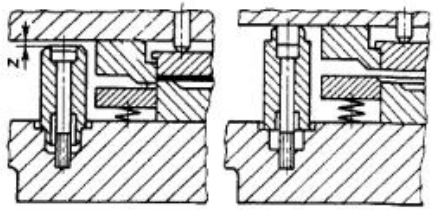


Рис. 59. Конструкция ограничителя закрытой высоты (ОЗВ) переналаживаемого по высоте

в определенном положении не допускают заглубления пуансона в матрицу и полностью освобождают пружины от нагрузки. В положении, показанное на рис. 59, *а*, они устанавливаются при работе штампа, а в положение, приведенное на рис. 59, *б* — в период его хранения.

Если во время работы штампа возникают нагрузки в направлении, перпендикулярном к оси ползуна пресса, то применяют одновременно цилиндрические и призматические направляющие (рис. 60). Последние вступают в работу раньше цилиндрических на величину l, зависящую от высоты H контактной поверхности призм и диаметра D колонок (размеры, мм):

D	63	71	80	100
H	80	100	110	140
l	20	20	25	25

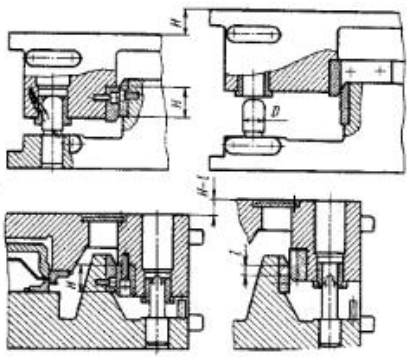


Рис. 60. Призматические направляющие штампа в сочетании с цилиндрическими колонками

В условиях современного прессового производства все крупные детали штампуют с применением средств механизации и автоматизации. В частности, штампы для выполнения разделительных операций оснащают или механизмами подъема заготовки (детали) для захвата механической рукой (см. рис. 57), или рычажным сбрасывателем *4* (рис. 61), которые работают преимущественно от пневмопривода (поз. *1*—*3*).

В соответствующих конструкциях штампов рекомендуется применять быстросменные пуансоны, особенно когда они отличаются низкой стойкостью. Для замены пуансонов и для проведения профилактических работ по смазыванию и заточке, очистке от грязи и др. для ограничения хода верхнего выталкивателя рационально предусматривать ступенчатые цилиндрические стержни *1* (см. рис. 57) Последние обеспечивают удобство для монтажа и демонтажа выталкивателя и других деталей без снятия штампа с пресса. За счет перестановки ограничительных стержней в горизонтальном направлении представляется возможность устанавливать выталкиватель в двух положениях: в рабочем и с заглублением его в нишу плиты для проведения заточки секций. Условия для осуществления съема выталкивателя со штампа обеспечиваются при более значительном выдвижении стержня из плиты.

Вопросы конструирования разделительных штампов неразрывно связаны со способами раскроя исходного материала. Помимо требований экономии листового материала, что учитывается при его раскрое, необходимо обеспечивать удобства и надежность работы штамповой оснастки. Небезразлично, в каком положении располагается штампуемая деталь, достаточна ли прочность перемычек, эффективна ли фиксация исходного материала и штампуемой заготовки, какими средствами обеспечивается заданная точность формы и размеров детали и др. Например, при сравнении двух схем раскроя с поворотом полосы (рис. 62) обнаруживается, что при поперечном расположении штампуемой детали (рис. 62, *а*) после первой штамповки

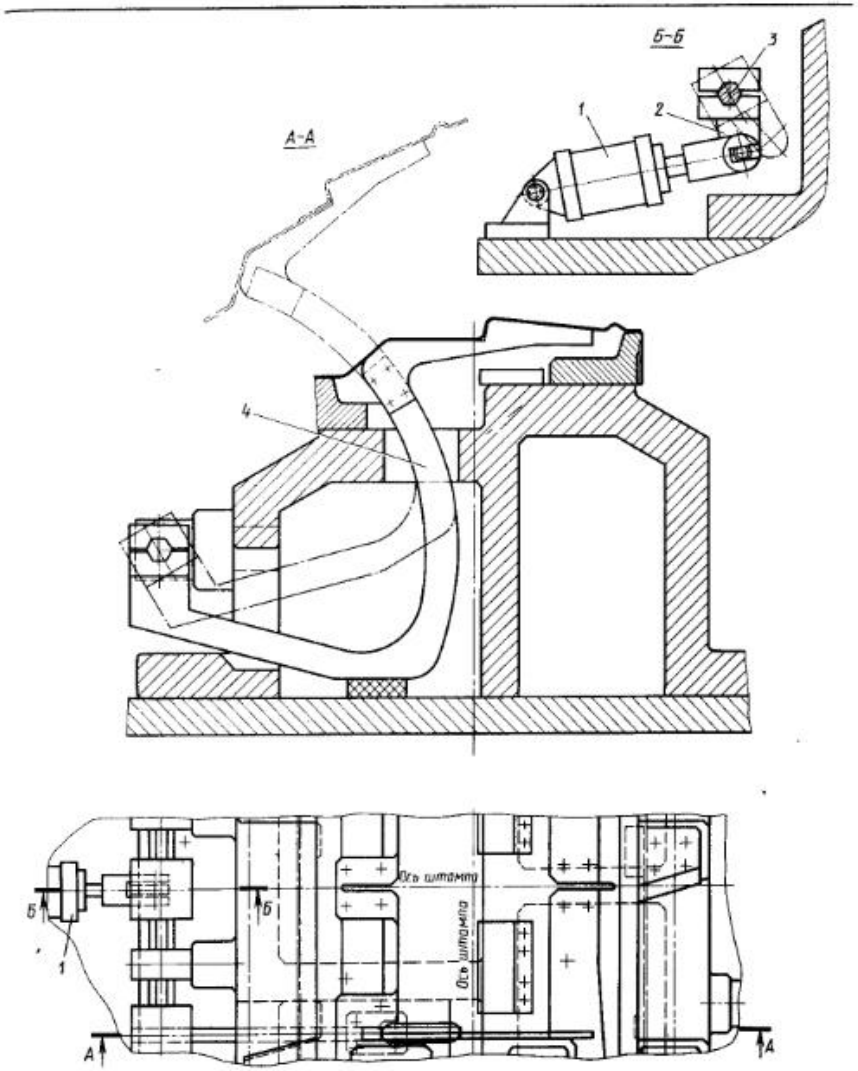


Рис. 61. Примеры средств механизации для подъема заготовки (детали) в штампе

(см. следы вырубки с обозначением *1*) форма сечения полосы преобретает серповидность и без правки малопригодна для второй штамповки — после поворота на 180°. При втором варианте раскроя (рис. 62, *б*) полоса сохраняет достаточную жесткость и прямолинейность после штамповки первого ряда заготовок (*1*) благодаря наличию широкого края A, что облегчает процесс штамповки.

При выполнении разделительных операций возникают и другие трудности. В частности, не всегда удается легко решить вопрос рационального расположения рабочих частей в пробивном штампе, если задается раскрой материала с большим числом отвер-

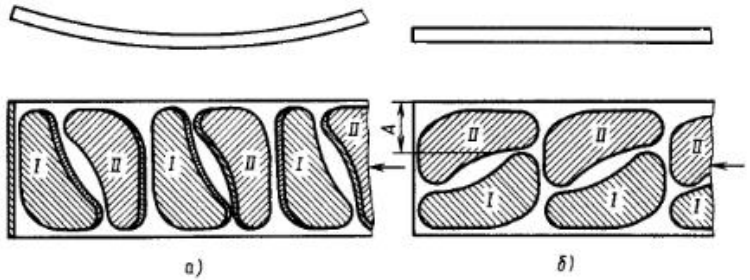


Рис. 62. Выбор схемы рационального раскроя

стий, расположенных на малом расстоянии c друг от друга. Характерным для этого случая является изготовление перфорированной ленты-дырчатки, состоящей из множества густо расположенных круглых отверстий одного диаметра. Главное затруднение заключается в соблюдении допускаемых расстояний между матрицами-глазками и в возможности осуществления надежного и удобного крепления пуансонов. Варианты расстановки пуансонов (соответственно и матриц-глазков в державке) приведены на рис. 63. Из схем планировки рабочих элементов штампа видно, что рациональные их координаты находятся в строгой зависимости от шага c сетки. Когда расстояние c между отверстиями в сетке относительно мало, то шаг подачи t материала и расстояние b между пуансонами в направлении подачи должны быть всегда больше расстояния c и кратны ему. Учитывая, что $b > t$, в общем виде можно записать

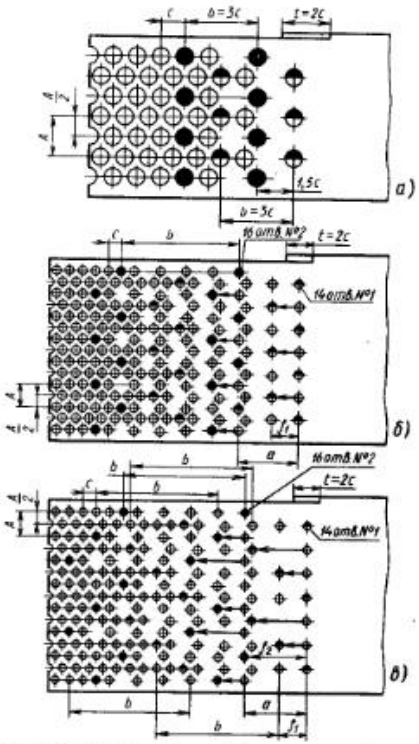


Рис. 63. Планировка рабочих позиций при последовательной штамповке часто расположенных отверстий в ленте (детали)

$$b = Kt + c, \qquad (2)$$

где K — любое целое число (1; 2; 3...).

Шаг подачи t принимают равным четному числу шагов c сетки, т. е. $t = nc$, где n — любое четное число (2; 4; 6...); как правило, $n = 2$. Таким образом, $t = 2c$ и формула (2) принимает вид

$$b = c\,(2K + 1).$$

Ближайшие рекомендуемые расстояния b между пуансонами следующие:

K	1	2	3	4	и т. д.
b	$3c$	$5c$	$7c$	$9c$	и т. д.

Следовательно, расстояние b может формироваться из любого нечетного числа шагов c, кроме единицы, но чем меньше b, тем компактнее штамп (при условии возможности размещения

5. Данные по размещению рабочих частей в штампах для перфорированной сетки (см. рис. 61)

Расстояние между отверстиями в сетке		K	t	a	b	f_1	f_2
В продольном направлении C	В поперечном направлении A						
Св. 3	Св. 2,5	4		$3{,}5c$	$9c$	$2c$	$4c$
До 3	До 2,5	7	$2c$	$7{,}5c$	$15c$	$4c$	—

Примечание. Таблица составлена без указания конкретного диаметра отверстий и размера перемычек в сетке. В пределах шага c сетки они могут быть различных сочетаний.

рабочих частей). Расстояние a от оси пуансонов одного поперечного ряда до ближайшего другого определяется по формуле

$$a = Kc + \frac{c}{2} \quad \text{или} \quad a = Kc - \frac{c}{2}. \qquad (3)$$

Расстояние A между осями ближайших четных или нечетных продольно расположенных рядов пуансонов связано зависимостью

$$A = c\sqrt{3}.$$

В целях обеспечения равномерной планировки пуансонов рекомендуется назначать $a \approx 1/2b$. Если же при этом не удается рационально разместить рабочие части, то выполняют дополнительный сдвиг их координат в направлении подачи на величину f_1 (рис. 63, *б*), кратную шагу сетки c или с чередованием: на f_1 и f_2, где f_2 также кратно c, но больше f_1 (рис. 63, *в*). Траектории смещения координат рабочих частей из основных поперечных рядов отверстий № 1 и 2 показаны стрелками. Обе схемы планировки рабочих частей построены со следующими параметрами: $n = 2$; $K = 4$; $t = nc = 2c$; $b = Kt + c = 4 \cdot 2c + c = 9c$; $a = 9c/2$.

Смещение координат рабочих частей штампа от основных поперечных рядов: в первой схеме (см. рис. 63, *б*) $f_1 = 2c$; во второй схеме (см. рис. 63, *в*) $f_1 = 2c$; $f_2 = 4c$.

В поперечном направлении: в четном ряду — восемь пуансонов, а в нечетном — семь. Однако число рядов пуансонов в направлении подачи удвоено, так как шаг подачи материала $t = 2c$. Следовательно, в четных рядах $8 \cdot 2 = 16$ пуансонов (в схеме они обозначены закрашенным кружком), а в нечетном $7 \cdot 2 = 14$ пуансонов (кружок закрашен наполовину). Всего в штампе тридцать пуансонов. В табл. 5 приведены рекомендуемые соотношения рассмотренных выше параметров, которые обеспечивают возможность применения в пробивных штампах вставных матриц-глазков.

В целях повышения надежности работы конструкции штампа при изготовлении перфорированной сетки рекомендуется устанавливать шаговые ножи.

Рассмотренная система планировки рабочих частей в последовательных штампах приемлема не только для изготовления перфорированной ленты, она рациональна при любой последовательной штамповке, когда возникает необходимость рассредотачивать рабочие контуры с отдалением их друг от друга. На рис. 64 приведен пример планировки рабочих частей при последовательной вырубке.

Разработка рациональной планировки рабочих частей в последователь-

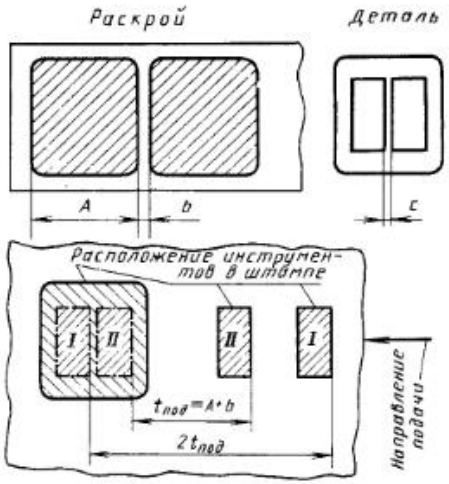


Рис. 64. Примеры размещения рабочих частей в последовательном штампе при малом расстоянии c между отверстиями в детали

ных штампах является одним из ответственных этапов конструкторской работы и решается в зависимости от конфигурации штампуемой детали.

При проектировании разделительных штампов особое внимание уделяется обеспечению *высокоточного направления между верхней и нижней частями штампа*. Основное требование сводится к тому, чтобы допускаемый сдвиг «верха» относительно «низа» по абсолютной величине был всегда меньше технологического зазора между рабочим окном (окнами) матрицы и пуансона (пуансонами). Практически это достигается за счет применения жестких посадок в направляющих узлах (см. с. 354).

Штампы для разделительных операций должны отвечать не только

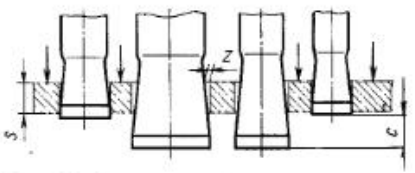


Рис. 65. Каскадное (ступенчатое) расположение пуансонов в штампе

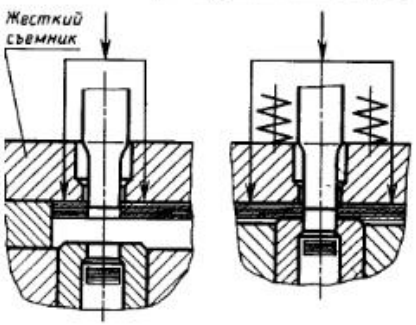


Рис. 66. Схема нагружения пуансонов при съеме с них штампуемого материала

своему основному служебному назначению: высококачественно осуществлять заданную операцию (вырубку, пробивку, отрезку и др.), но и при необходимости обеспечивать возможность снижения технологического усилия. Это может быть достигнуто путем применения уклонов на режущих элементах (см. гл. 2, с. 31) или при наличии в штампе нескольких рабочих частей (рабочих контуров), расположенных по высоте каскадно — ступенями (рис. 65). Этот метод доступен для последовательных, совмещенных и пробивных штампов. Перепад C между ступенями должен быть не менее $2/3s$.

Когда обрабатывается толстолистовой металл и особенно труднодеформируемая сталь, разделительные операции выполняют с нагревом заготовок.

Усилие съема штампуемого материала с пуансонов после вырубки и пробивки (рис. 66) зависит от размеров сечения технологических перемычек и зазора резания, от механической характеристики штампуемого материала, формы и размеров режущего контура. Пуансон со штампуемым материалом после вырубки (пробивки) рассматривают как систему соединения двух деталей с определенным натягом. Сопротивление съему создается упругой силой деформации, обусловленной величиной натяга. При этом возникает сила трения между деформируемым материалом и пуансоном. Усилие

съема материала с пуансона равно полной силе трения, Н:

$$T = p_n F_{ист} f, \qquad (4)$$

где $F_{ист}$ — истинная площадь контакта штампуемого материала с пуансоном, мм²; f — коэффициент трения между штампуемым материалом и пуансоном; p_n — давление на контактной поверхности, возникаемое в результате натяга при запрессовке штампуемого материала, МПа.

При круглом рабочем контуре и кольцевом отходе

$$p_n = \frac{\delta}{\frac{d}{E_1}\left(\frac{D^2+d^2}{D^2-d^2}+\mu_1\right)+\frac{d}{E_2}(1-\mu_2)}, \qquad (5)$$

где δ — натяг, мм (для данного случая принимаем $\delta = 0{,}001d$); d — диаметр пуансона, мм; D — наружный диаметр кольцевого отхода, мм; E_1 и E_2 — модули упругости первого рода соответственно штампуемого материала и материала пуансона, МПа; μ_1 и μ_2 — коэффициенты Пуассона соответственно штампуемого материала и материала пуансона. Средние значения E и μ для некоторых материалов приведены в табл. 6.

Давление p_n может также определено по формуле, предложенной Б. П. Зворono:

$$p_n = \frac{2b\sigma_s}{d},$$

где b — ширина перемычки мм. Применение этой формулы ограничено до $b/d = 0{,}2$.

Расчет усилия съема материала с круглого пуансона при прямоугольной заготовке, в том числе полосы или ленты (рис. 67), производят с учетом переменной ширины b перемычки. В формулу (4) вместо p_n подставляют его среднее значение $p_{n\,ср}$, т. е.

$$T = p_{n\,ср} F_{ист} f.$$

Давление $p_{n\,ср}$ — среднее значение между p_n при минимальной кольцевой перемычке b_{min} и p_n — при максимальной кольцевой перемычке, равной

6. Значения модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ для некоторых материалов (при 20 °С)

Материал	$E\cdot10^{-5}$, МПа	μ
Стали:		
с большим содержанием углерода типа У8А, У10А, У11	До 2,2	0,29
низкоуглеродистые	2,0—2,1	0,28
Никель	2,0	0,33
Биметалл (термометалл) типа Т6-1 и др.	1,5	≈0,3
Чугун серый	0,9—1,6	0,25—0,27
Латунь типа Л63, Л68	0,9—1,4	0,32—0,42
Медь техническая типа АМЦ, КМЦ	1,1—1,3	0,3
Титановые сплавы типа ВТ1, ВТ3	1,1	0,27
Цинк типа ЦВ, Ц0, Ц1, Ц2	0,8	0,27
Алюминиевые сплавы типа Д1, Д6, АМЦ, АМГ	0,72	0,26—0,33
Магниевые сплавы типа МА1, МА2	0,45	0,32
Свинец типа С0, С1, С2, С3	0,2	0,45
Твердый сплав	0,5	—

Примечание. Значение модуля упругости практически не зависит от вида термической обработки, а следовательно, и от твердости материала.

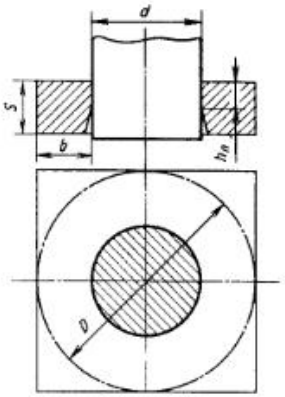


Рис. 67. Схема соединения пуансона со штампуемым материалом во время съема

d (т. е $h_{max} = d$), рассчитанных по формуле (5).

Истинную площадь $F_{ист.п}$ (мм²) контакта штампуемого материала с пуансоном (на поверхности среза) в общем виде определяют по формуле

$$F_{ист.п} = Lh_п, \qquad (6)$$

где L — периметр среза; $h_п$ — высота пояска на торце срезанного контура детали, находящегося в контакте с пуансоном, мм.

В частном случае для круглого рабочего контура (рис. 67) $F_{ист.п} = \pi d h_п$.

Высота $h_п$ зависит от величины технологического зазора, рода материала, отношения d/s. После чистовой вырубки, когда зазор между матрицей и пуансоном не превышает 0,01—0,02, высота $h_п$ приближается к толщине s штампуемого материала. При обычных работах высота $h_п$ колеблется в пределах (0,5—0,8) s. В табл. 7 приведены значения высоты $h_п$, рекомендуемые для расчетов.

Трение между штампуемым материалом и поверхностью пуансона по природе ближе к сухому, так как в процессе их взаимной запрессовки масляная пленка практически не удерживается. Ниже приведены значения коэффициента трения f для ряда распространенных сплавов.

7. Максимальная высота $h_п$ пояска на торцах деталей и отходов

Штампуемый материал	$\sigma^*_{сд}$, МПа	$h_п$ (% от s)
Стали: с большим содержанием углерода типа У7А, У8А, У10А легированные 65Г, 40Х, 60С2А, 25ХГСА, 30 ХГСА, 18Х1Н9Т углеродистые типа 40, 45, 50	550—650	50
Стали: типа 25, 30, 35	450	55
08кп, 08, 10кп, 15кп, 20кп, 20, 12ГС	400	60
Титановые сплавы типа ВТ1-0, ВТ1-00	450	55
Латунь типа Л63, Л68	300	60
Биметалл (термобиметалл)		
Медь техническая		
Магниевые сплавы	200	65
Алюминиевые сплавы типа:		
АМГ, Д1, Д6	200	65
АМЦ, АД	160	70
Д16	400	60
Алюминий А1, А2, А0	75	80
Свинец типа С0, С1, С2	25	90

* Ориентировочно.

Примечание. Приведенные значения $h_п$ соответствуют результатам, полученным в обычных штампах с принятыми режущими зазорами. При высокоточной (чистовой) вырубке независимо от марки (и толщины) штампуемых материалов $h_п = s$.

Магниевые, алюминиевые сплавы типа АМГ	0,25—0,3
Латунн, бронзы, медь	0,3—0,4
Стали углеродистые н легированные	0,35—0,4
Алюминиевые сплавы типа АМЦ, никель, цинк	0,3—0,5

Меньшие значения f соответствуют давленню 100—120 МПа, а большие 10—30 МПа.

Усилие съема материала с пуансона удобнее выражать через потребное усилне вырубки—пробинкн:

$$T = \eta_п P, \qquad (7)$$

где $\eta_п$ — относительное усилие съема материала с пуансона, выраженное в % от усилия вырубки пробивки.

Соответствующие значения $\eta_п$ для наиболее распространенных металлов без учета потерн жесткости штампуемой детали (заготовки) прнведены в табл. 8. Величнна $\eta_п$ подсчитана по приведенным выше формулам для круглого рабочего отхода при наличии прямоугольного отхода (прямоугольной карты, полосы, ленты) с учетом среднего давления $p_{п\,ср}$. Для круглого контура с круглым отходом значения $\eta_п$ меньше значеннй, приведенных в табл. 8. Его подсчитывают по формулам (4), (5) и (7) без корректировкн $p_п$.

В отличие от круглых, прн некруглых рабочнх контурах контакт между пуансоном и штампуемым материалом неравномерный. На прямолинейных участках перемычкн штампуемого материала прогибаются от давлення $p_п$ (рис. 68), что сопровождается некоторым растяжением штампуемого материала. Натяг сохраняется в основном только в углах вырубаемого контура (в зонах *I* и *II*). В приближенных расчетах усилие съема материала с пуансона, напрнмер при наличнн прямоугольного рабочего контура, определяют по формуле

$$T = \eta_п K_{кор} P, \qquad (8)$$

где значения $\eta_п$ прнведены в табл. 8; $K_{кор}$ — коэффициент корректировки, принимаемый в зависимости от b/l:

b/l	До 0,04	Св. 0,04 до 0,06	Св. 0,06 до 0,1	Св. 0,1 до 0,15	Св. 0,15 до 0,2	Св. 0,2
$K_{кор}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

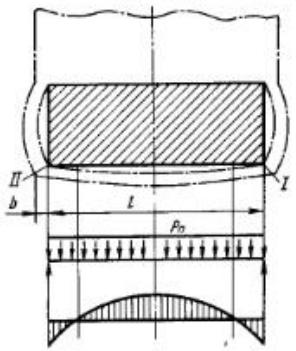


Рис. 68. Схема к расчету усилия съема штампуемого материала с прямоугольного пуансона

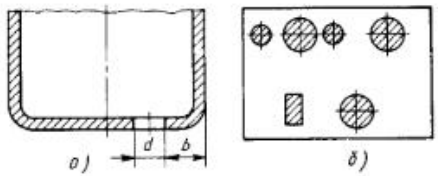


Рис. 69. Примеры расположения отверстий, когда относительное усилие съема штампуемой детали с пуансонов принимается максимальным

где l — длинная сторона прямоугольника, учнтывается в табл. 8 вместо диаметра d. Для некруглых контуров любой формы выбирается участок длиной l с наиболее ослабленным сечением перемычкн.

Прн пробивке отверстий в дне полых деталей (коробок, стаканов) значенне $\eta_п$ берут из табл. 8 для $b/d = 1$ независнмо от расстояния b от боковой поверхности до начала отверстня (рис. 69, *а*). Аналогично поступают и при групповой пробивке отверстий в плоской заготовке (рис. 69, *б*).

Относительное усилие съема с пуансона неметаллических материалов (в % от P) составляет:

для материалов на основе резины	0,5—0,8
для термопластов . . .	2,5—5
для слоистых пластмасс	3,5—6

8. Относительное усилие съема прямоугольного отхода (полоса, лента) с круглого пуансона $\eta_п$ (% от P) в зависимости от отношения b/d (см. рис. 67) при обычных (усредненных) зазорах резания

Материал	$\eta_п$ при отношении b/d														
	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Стали: высокоуглеродистые и легированные 25; 30; 35	1,52	1,57	1,68	1,8	1,86	1,94	2,11	2,15	2,24	2,57	2,66	2,73	2,83	2,9
низкоуглеродистые 08кп, 20кп	2,09 2,61	2,17 2,7	2,32 2,9	2,45 3,07	2,57 3,22	2,68 3,35	2,9 3,48	3,09 3,94	3,38 4,31	3,55 4,59	3,69 4,63	3,79 4,76	3,92 4,94	4,0 5,0
Магниевые сплавы	1,1	1,12	1,2	1,25	1,3	1,35	1,46	1,55	1,66	1,81	1,9	1,97	2,04	2,1
Титановые сплавы типа ВТ1—0 и ВТ1—00	1,3	1,34	1,41	1,5	1,56	1,62	1,76	1,87	2,04	2,18	2,23	2,33	2,35	2,5
Латунь типа Л68, Л63; биметалл (термобиметалл), медь техническая	1,77	1,83	1,95	2,05	2,15	2,23	2,43	2,6	2,85	3,0	3,11	3,25	3,34	3,4
Алюминиевые сплавы типа: АМГ, Д1, Д6	1,81	1,87	1,98	2,08	2,17	2,26	2,46	2,62	2,85	3,05	3,18	3,28	3,4	3,5
Д16	1,96	2,02	2,14	2,24	2,34	2,43	2,64	2,8	3,05	3,26	3,38	3,49	3,62	3,8
АМЦ, АД	3,18	3,28	3,48	3,66	3,83	3,99	4,33	4,61	5,04	5,39	5,6	5,79	6,0	6,15
Алюминий А1, А2, А0 и др.	4,24	4,37	4,6	4,85	5,1	5,25	5,7	6,1	6,7	7,1	7,4	7,65	7,95	8,2

Примечания: 1. При ширине перемычки b, превышающей диаметр рабочего контура ($b/d > 1$), относительное усилие съема принимают из последней строки (для $b/d = 1$).
2. При чистовой высокоточной вырубке — пробивке значение $\eta_п$ принимают на 50—70 % больше, чем приведенное в таблице.

По аналогии с металлическим листовым прокатом диапазон усилия съема неметаллических материалов принимают в зависимости от относительной ширины перемычек. Учитывая малую величину напряжения на срез (в среднем $\sigma_{ср} \leqslant 50 \div 100$ МПа), приведенные выше относительные усилия съема материала с пуансона практически незначительны.

Усилие проталкивания заготовки после вырубки или отходя после пробивки через рабочую полость матрицы определяют из зависимости, аналогичной той, которую применяют при подсчете усилия съема с пуансона:

$$Q_{прот} = p_м F_{ист.\,м} f, \qquad (9)$$

где $p_м$ — давление на стенки матрицы от натяга в результате запрессовки вырубленной заготовки или отхода после пробивки отверстия; $F_{ист.\,м} = Lh_м$ — истинная площадь контакта штампуемой детали (отхода) в проеме матрицы [по аналогии с формулой (6)]; f — коэффициент трения между стенкой матрицы и штампуемым материалом (см. с. 391).

Поскольку давление на стенки матрицы от запрессовки штампуемого материала относительно мало, то охватывающую деталь — матрицу считают жесткой — неподатливой системой. Такое допущение позволяет условно принимать наружный размер матрицы бесконечно большим по отношению к размерам ее рабочего окна, а отношение $(D^2 + d^2)/(D^2 - d^2)$ близким к единице. В этом случае формула (5) упрощается, и уравнение для определения давления $p_м$ принимает следующий вид:

$$p_м = \frac{\delta}{\frac{d}{E_2}(1 + \mu_2) + \frac{d}{E_1}(1 - \mu_1)}. \qquad (10)$$

Принимая коэффициент Пуассона для материала матрицы (высоколегированная или высокоуглеродистая сталь) постоянным ($\mu_2 = 0{,}29 = \text{const}$), получаем

$$p_м = \delta \left| \left[\frac{d}{E_1}(1 - \mu_1) + 1{,}29 \frac{d}{E_2} \right]. \qquad (11)$$

9. Относительное усилие проталкивания одной вырубленной детали или одного отхода через круглое отверстие матрицы $\eta_м$ без учета потери жесткости детали (отхода)

Материал	$\sigma_{ср}$, МПа (ориентировочно)	$\eta_м$, % от P
Стали:		
высокоуглеродистые и легированные	550—650	3,5
25, 30, 35	450	4
низкоуглеродистые 08кп, 20кп и др.	400	6,6
Магниевые сплавы	200	4
Титановые сплавы	450	4,5
Латуни Л63, Л68; биметалл (термобиметалл); медь техническая	300	5
Алюминиевые сплавы, типа:		
АМГ, Д1, Д6 и др.	200	5,4
Д16	400	5,6
АМЦ, АД	160	9,6
Алюминий А1, А2, А0 и др.	75	12,5

Примечание. При учете потери жесткости деталей (отходов) относительное усилие проталкивания уменьшается пропорционально увеличению отношения d/s. Соответствующие коррективы вносятся на основании формул (13)—(16) и графика, приведенного на рис. 71.

По аналогии с формулой (7) усилие проталкивания деталей или отходов через рабочий проем матрицы удобнее выражать относительным усилием вырубки—пробивки

$$Q = \eta_м P n, \qquad (12)$$

где $\eta_м$ — относительное усилие проталкивания детали или отхода через матрицу, в % от технологического усилия P; n — число одновременно

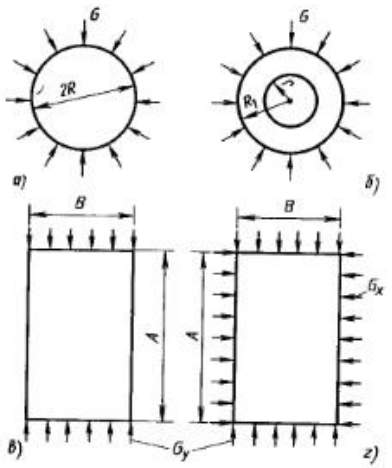


Рис. 70. К определению критического напряжения штампуемого материала, находящегося в рабочем окне матрицы

застрявших в матрице деталей или отходов.

Значения $\eta_м$ (табл. 9) для наиболее распространенных металлов (сплавов) определены на основании проведенных расчетов по формулам (9) и (11) без учета жесткости штампуемых деталей и отходов. При подсчете $F_{ист.м}$ принимают $h_м \approx h_ц$ (практически $h_м$ незначительно меньше $h_ц$).

С увеличением размеров штампуемой детали относительное усилие проталкивания ее через матрицу уменьшается, что связано с уменьшением ее жесткости. Деталь или отход, находящийся в рабочем проеме матрицы, нагружается сжимающей силой от давления $p_м$ (рис. 70). Когда давление $p_м$ по величине больше критического напряжения $\sigma_{кр}$, при котором деталь (отход) начинает терять устойчивость, появляется некоторый ее прогиб (выпучивание) и ослабление натяга между штампуемым материалом и матрицей. Сплошная круглая деталь или отход (рис. 70, *а*) нагруженные равномерно распределенной радиально-сжимающей силой, начинает терять свою устойчивость при критическом напряжении, МПа:

$$\sigma_{кр} = 4{,}196 \frac{Es^2}{12(1-\mu^2)R^2}; \quad (13)$$

для детали типа шайбы (рис. 70, *б*)

$$\sigma_{кр} = K_1 \frac{Es^2}{12(1-\mu^2)R_1^2}; \quad (14)$$

для деталей и отходов прямоугольной формы

$$\sigma_{кр} = K_2 \frac{Es^2}{12(1-\mu^2)B^2}, \quad (15)$$

где s, E и μ — соответственно толщина, модуль упругости и коэффициент Пуассона штампуемого материала; K_1 — коэффициент, зависящий от отношения r/R:

r/R	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
K_1	4,0	3,5	3,1	2,9	2,5

K_2 — коэффициент, зависящий от отношения A/B.

При защемлении детали (отхода) с двух противоположных сторон (рис. 70, *в*)

A/B	0,2	0,3	0,4	0,5
K_2	266	130	83	61,5
A/B	0,6	0,7	0,8	Св. 0,8
K_2	50,5	44,5	41,5	≈40

При защемлении детали (отхода) с четырех сторон (рис. 70, *г*)

A/B	1,0	2,0	3,0	Св. 3
K_2	19,7	12,3	10,9	9,86

Формула (15) справедлива при условии, если $\sigma_{кр}$ не превышает предела пропорциональности $\sigma_{пц}$ штампуемого материала. При $\sigma_{кр} > \sigma_{пц}$ в расчетах используют критическое напряжение $\sigma_{кр}$, условно принимаемое равным напряжению текучести σ_s.

Если деталь или отход, находящийся в матрице, свободно проталкивается пуансонами без прижима (без противодавления), то потеря их устойчивости наступает при условии $p_м \geqslant \sigma_{кр}$. Для учета жесткости детали или отхода в формулу (12) введен поправочный коэффициент $C = p_м/\sigma_{кр}$:

$$Q = C\eta_м P n. \quad (16)$$

Значение коэффициента C при круглом рабочем контуре (см. рис. 70)

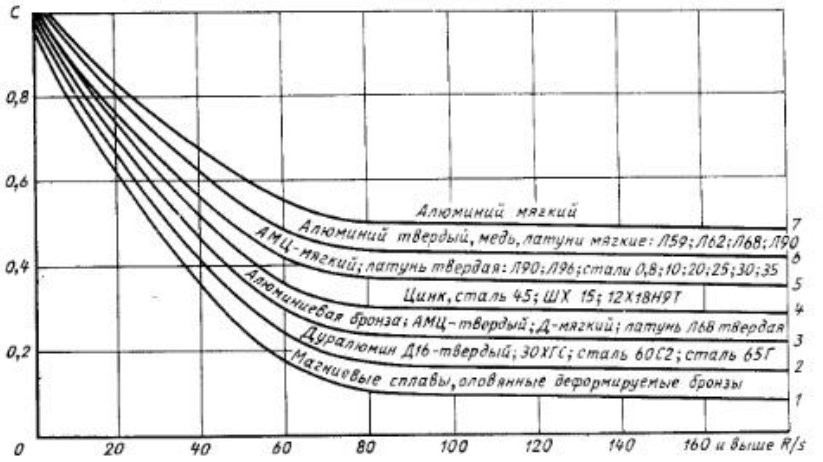


Рис. 71. Зависимость коэффициента C от $P/\sigma_{кр}$ и R/s для различных сплавов

в зависимости от отношения R/s определяют по графику, приведенному на рис. 71. Кривые построены на основе расчетов по приведенным выше формулам для наиболее распространенных штампуемых материалов. Для учета величины коэффициента C при подсчете усилия проталкивания деталей типа шайб и деталей некруглых контуров вводят поправки, исходя из следующих математических зависимостей:

для шайб

$$R = R_1\sqrt{\frac{K_1}{4{,}196}} = 0{,}49R_1\sqrt{K_1};$$

для некруглых контуров

$$R = \frac{B}{2}\sqrt{\frac{K_2}{4{,}196}} = 0{,}245B\sqrt{K_2}.$$

Координаты по оси абсцисс на рис. 71 соответственно для деталей (отходов) типа шайб $R/s = [0{,}49R_1\sqrt{K_1}]/s$; для некруглых контуров $R/s = [0{,}245B\sqrt{K_2}]/s$.

При наличии сильного прижима, обеспечивающего надежное защемление вырубленной детали или отхода в матрице, расчет усилия их проталкивания производят по формуле (12) без введения коэффициента C. *Потребное усилие проталкивания деталей (отходов) из неметаллических материалов* незначительно, поэтому введение коэффициента C практического смысла не имеет.

Усилие прижима штампуемого материала в процессе односторонней резки (см. рис. 11) определяют исходя из силы отталкивания (сдвига) материала при его деформировании. Задача сводится к тому, чтобы удержать материал в состоянии покоя. Чем больше величина режущего зазора z, тем больше отталкивающее усилие N. Согласно опытным данным, усилие сдвига N полосы (ленты, карты) в сторону, противоположную подаче, при односторонней резке ориентировочно принимают равным (0,1—0,4) $P_{рез}$. Принимая $N = 0{,}2$, уравнение равновесия сил, действующих на полосу (ленту) при данном процессе, получим в следующем виде:

$$0{,}2Pf = Q(f + f_1), \quad (17)$$

где f — коэффициент трения между штампуемым материалом и матрицей ($f \approx 0{,}2$); Q — усилие прижима; f_1 — коэффициент трения между штампуемым материалом и прижимом ($f_1 \approx 0{,}3$). Подставляя средние значения коэффициентов f и f_1 в формулу (17), получим величину Q для штампа

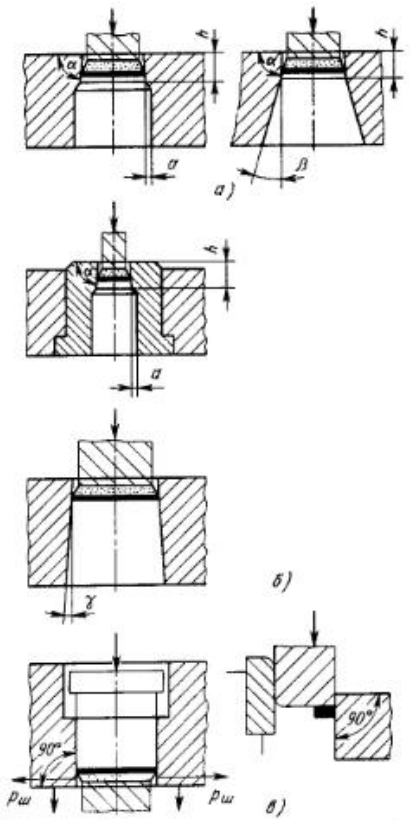


Рис. 72. Геометрические параметры рабочих элементов матриц

с прямолинейным режущим контуром l, направленным перпендикулярно к продольной оси подачи; $Q \approx \approx 0{,}08P_l$. Этого усилия достаточно для сохранения неподвижности заготовки и для обеспечения чистой поверхности среза в зоне разделения. Однако нередки случаи, когда усилие пружин не достигает расчетной величины Q. Штампы при этом работают, но без гарантии получения высокого качества штампуемых деталей.

В процессе безотходной последовательной вырубки деталей вопрос сохранения неподвижности полосы (ленты) во время отрезки заготовки эффективно решается при опережающем действии пуансонов для пробивки отверстий за счет увеличенной их длины по сравнению с пуансоном, отделяющим заготовку.

При всех криволинейных контурах односторонней резки потребное усилие прижима будет меньше, так как на изгибах сила сдвига направлена под углом к продольной оси подачи материала.

Основой для осуществления разделительных процессов в штампах являются их рабочие части с режущими элементами, геометрия которых выполняется по определению установленным правилам. В преобладающем большинстве случаев угол α между рабочими поверхностями, сходящимися к режущей кромке (грани) матрицы и пуансона, принимается равным 90° (рис. 72). Значение $\alpha = 90°$ считается оптимальным, так как при этом обеспечивается наибольшая стойкость и надежность в работе штампа. Незначительные отклонения угла α ($\pm 10 \div \div 15°$) не оказывают существенного влияния на процесс разделения листового металла.

Рабочая полость матрицы может выполняться в трех исполнениях: с местным пояском (рис. 72, *а*), с уклоном по всей высоте (рис. 72, *б*) и с вертикальными стенками по всей высоте (рис. 72, *в*). Так как деталь или отход в процессе вырубки внедряются в рабочую полость (окно) матрицы с некоторым давлением $p_ш$, возникает распирающая сила N, которая стремится разрушить (разорвать) матрицу. Поэтому при сквозном проталкивании деталей (отходов) — напровал — рекомендуется выполнять рабочее отверстие (окно) матрицы с расширением к выходу, что представляет возможность уменьшить толщину ее стенок с сохранением надежной стойкости от разрушения. Наибольшее распространение получили матрицы с местным пояском высотой $h_п$ и уширением в остальной части за счет уклона с углом $\beta = 3 \div 5°$ или с равномерным освобождением на размер a. Рекомендуемые значения высоты пояска приведены в табл. 10. При данной конструкции режущую кромку следует выполнять под углом 90° (отклонение $-15 \div -45'$), т. е. с гарантированным уклоном. Матрицы

с уклоном по всей высоте рабочего проема наиболее экономичны, так как их можно затачивать (сошлифовывать) на значительную глубину, без потери их работоспособности. Это достигается за счет малой величины уклона γ (в мин), который назначают в зависимости от толщины штампуемого материала, мм:

s	γ
До 0,5	8—10′
Св. 0,5 до 1,0	10—15′
» 1,0 » 2,0	15—20′
» 2,0 » 4,0	30′
» 4,0 » 6,0	45′
» 6,0	60′

Вариант исполнения рабочего проема с вертикальными стенками (без уклона) широко применяют в совмещенных штампах, когда штампуемая деталь после вырубки не проталкивается напровал, а принудительно возвращается из канала в обратном направлении. Кроме того, применение рабочей грани матрицы без уклона возможно в штампах при выполнении односторонней резки штампуемого материала (см. рис. 11 и 12). При чистовой высокоточной вырубке рабочее окно матрицы также выполняют с вертикальными стенками, так как схема вырубки или пробивки протекает с принудительным возвратом готовой детали и отходов из канала матрицы. В особых случаях режущую грань выполняют притупленной — в виде фаски или радиуса (например, при зачистке поверхности торца вырубленной заготовки).

Геометрия режущих граней пуансонов также разнообразна, как и геометрия матриц. Для резки войлока, резины, пробки, бумаги, ткани, а также эбонита в нагретом состоянии угол резания пуансонов $\alpha = 10 \div 15°$; для термопластиков (целлулоида, полиэтиленов и др.) $\alpha = 18 \div 25°$; для слоистых пластмасс (некоторые сорта гетинакса, текстолита и др.) $\alpha = = 30 \div 40°$. Для вырубки—пробивки металлического листового материала применяют преимущественно пуансоны с углом заточки режущей грани 90°. Для пробивки отверстий диаметром

10. Рекомендуемая высота $h_п$ рабочего пояска матрицы (размеры, мм)

Высота (толщина) матрицы H	При d^*/H для матриц			
	легконагруженных		тяжелонагруженных	
	До 1	Св. 1	До 1	Св. 1
12	3	4—5	4	5
16	4	5—6		
20			5	6
Св. 20 до 28	5	6—7	6	8—9
» 28 » 36	6	8	8	9—10
» 36 » 45	8	10	10	12

* d — диаметр или ширина рабочего окна матрицы.

$d > 40$ мм (ориентировочно) их изготовляют с подрезкой торца (рис. 73, *а*), что уменьшает площадь поверхности для шлифования. Пуансоны, предназначенные для пробивки отверстий относительно малого диаметра при $d/s \leqslant 1{,}5$ (рис. 73, *б*) в листовом металле $s > 4$ мм ($\sigma_в \geqslant \geqslant 250$ МПа), рекомендуется выполнять с углом резания $\alpha > 90°$ (ориентировочно $\alpha = 110 \div 120°$), отчего их стойкость значительно повышается, но усложняется их заточка. В металлах с $s \geqslant 6$ мм, когда возможна потеря устойчивости пуансона (с отклонением от центра действия), целесообразно пробивать отверстия пуансонами с заостренным центром. При обработке толстого листового материала на рабочей поверхности пуансона целесообразно выполнять поднутрение на угол $\gamma = 0° 30' \div 1°$ (рис. 74, *в*), что

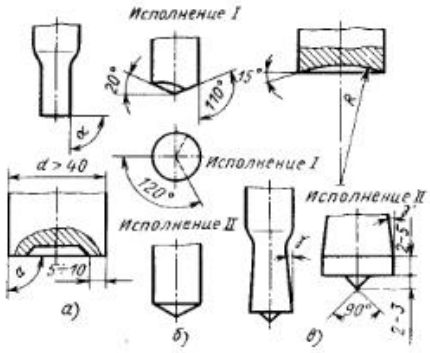


Рис. 73. Рациональные формы режущей части пуансонов

снижает работу резания и уменьшает усилие съема штампуемого материала. В некоторых случаях пуансон, как иногда и матрицу, выполняют с притуплением режущей грани, вследствие чего уменьшается величина скола штампуемого материала и повышается качество поверхности отверстия, однако стойкость пуансона при этом уменьшается.

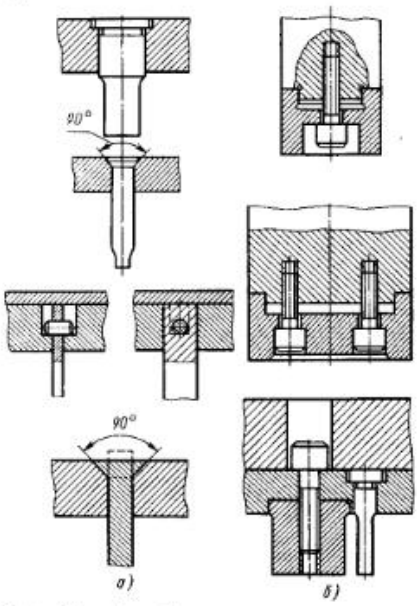


Рис. 74. Способы крепления пуансонов с применением посадок с натягом

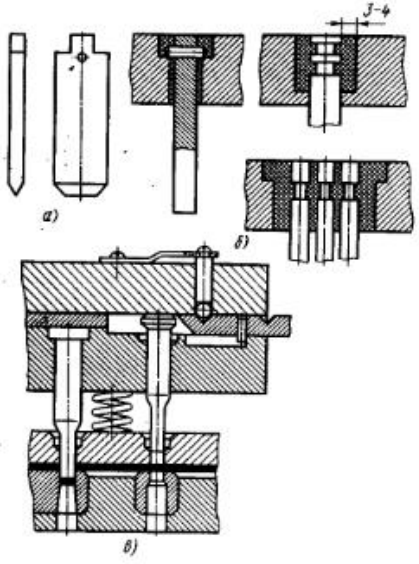
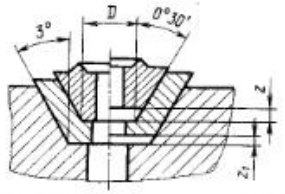


Рис. 75. Специальные способы крепления пуансонов

Общая форма рабочих частей (деталей) для различных конструктивных вариантов разделительных штампов отработана длительной практикой с учетом экономного расхода высоколегированной и инструментальной сталей. Наиболее распространенные детали стандартизованы. К ним, как указывалось выше, относятся прежде всего пуансоны и матрицы для пробивки круглых, квадратных и другой формы унифицированных отверстий. Способы крепления рабочих деталей определяются их формой и габаритами. Мелкие пуансоны и матрицы крепятся преимущественно в державках с применением посадок с натягом (рис. 74, *а*), а крупные — непосредственно к плитам с помощью винтов и штифтов. В особых случаях при малых габаритных размерах пуансонов допускается также крепление их к державкам с помощью винтов (рис. 74, *б*). Надежность фиксации пуансонов в этом случае гарантируется неглубокой «врезкой» в державки.

11. Размеры зазоров z и z_1 (размеры, мм)



D	z (пред. откл. ± 0,2)	z_1 (пред. откл. ± 0,1)
До 120	1,75	0,4
Св. 120 до 160	2,50	
» 160 » 240	2,75	

Специальные пуансоны, в зависимости от их назначения, бывают весьма разнообразны по конструкциям и в некоторых случаях значительно отличаются от стандартизованных. Примером может служить пуансон для вырезки пазов в пластинах радиаторов. Его конструкция (рис. 75, *а*) отличается экономичностью и технологична для изготовления. Отверстие в зоне крепления предназначено для размещения стержня (штифта), который удерживает пуансон от выпадания из державки. Не стандартизованы также пуансоны, закрепляемые эпоксидной композицией (рис. 75, *б*) и переналаживаемые (рис. 75, *в*).

Матрицы и пуансоны для некруглых рабочих контуров выполняют из цельной заготовки (при их малых габаритах) с учетом обеспечения технологичности изготовления, а более крупные из нескольких частей — секций. Однако в целях снижения трудоемкости изготовления и повышения технологичности часто прибегают к секционному варианту (при относительно малых габаритах). Примеры подобных матриц приведены на рис. 76. Их отличительной особенностью является наличие труднодоступных участков, из-за которых практически невозможно изготавливать матрицу из монолитной (цельной) заготовки.

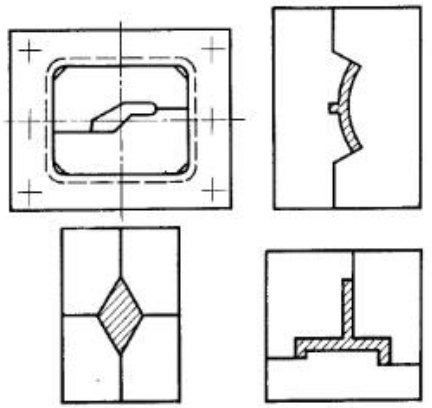


Рис. 76. Малогабаритные матрицы с труднодоступными участками, требующими применения секций

Рабочие части штампов для чистовой вырубки, помимо высокой точности размеров, должны иметь высокую жесткость, так как по нагружению они сравнимы с инструментом для холодной объемной штамповки. Учитывая это, наиболее целесообразно, чтобы матрицы и прижимы, оснащенные клиновыми ребрами, имели коническую посадку с уклоном 0° 30′ (рис. 77). Если они секционные, то их врезают в обойму, а если цельные — непосредственно в плиту штампа. Обойма, как промежуточная деталь между плитой и рабочей частью штампа, врезается в плиту с уклоном 3—5°. Исполнительные размеры зоны запрессовки матрицы и обоймы назначают с учетом обеспечения натяга. В табл. 11 приведены размеры зазоров z и z_1, обеспечивающие получение гарантированного натяга.

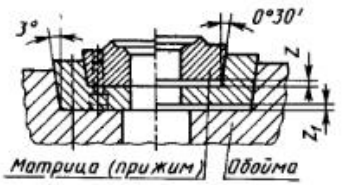


Рис. 77. Схема сборки матрицы (пуансона) с обоймой и нижней плитой

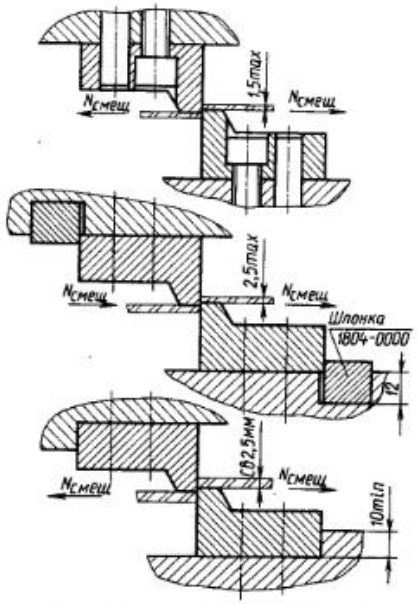


Рис. 78. Способы предотвращения смещения секций от силы $N_{смещ}$

Деталн с круглым рабочим контуром и при значительных габаритных размерах (ориентировочно диаметром до 300—400 мм) в большинстве случаев изготавливают цельными. Секционные матрицы и пуансоны (см. рис. 56) с любой конфигурацией могут нметь практически неограниченные размеры (в зависимости от размеров штампуемой детали и возможностей оборудования). Применение секций повышает технологичность изготовления рабочих частей, облегчая их механическую и термическую обработку. В целом, трудоемкость изготовления секционных рабочих частей возрастает по сравнению с несекционными, однако при этом повышается надежность выполнения термической обработки, а также облегчаются шлифовально-отделочные работы. В процессе эксплуатации штампа при повреждении какого-либо элемента рабочего контура замене или восстановлению подвергается только вышедшая из строя секция, а не целиком матрица или пуансон. Размеры отдельных секций и линии разъема (стыковки) устанавливаются индивидуально — в процессе конструирования с обеспечением технологичности изготовления и надежности крепления.

Секционную матрицу можно устанавливать и закреплять непосредственно на нижней или верхней плите (в зависимости от схемы штампа) или с применением монтажной плиты. Основным средством фиксации служат цилиндрические штифты, которые одновременно удерживают секции от сдвига во время выполнения разделительных операций. При обработке штампуемого металла толщиной $s \leqslant 1{,}5$ мм, когда усилия, возникающие в проеме матрицы $N_{смещ}$, невелики, штифты, как правило, достаточно надежно удерживают секции от смещения, а при $s > 1{,}5$ мм требуется более прочная опора. Ее осуществляют двумя способами: непосредственной врезкой в несущую плиту (основную или монтажную) или с помощью врезных шпонок (рис. 78). Для того чтобы технически обосновать выбор варианта фиксации секций от сдвига, необходимо выполнить расчет, сущность которого заключается в определении силы, сдвигающей секцию со своего зафиксированного положения, и сопоставление ее с силой, при которой может происходить смятие плиты в зоне штифтов, а также соответствующий их изгиб, что приводит к некоторому смещению секции и, как следствие, к нарушению технологического режущего зазора.

Усилие, смещающее секцию, определяют из уравнения

$$N_{смещ} = N_н + N_q - N_т, \quad (18)$$

где $N_н$ — распирающая (нормальная) сила давления на боковую стенку секции, возникающая в процессе разделения сдвигом; N_q — нормальная сила давления торцов деталей, поступивших после вырубки; $N_т$ — сила трения между опорной плитой и секцией.

При вырубке замкнутого контура

$$N_н = (0{,}3 \div 0{,}4)\, P_l.$$

При односторонней резке в зависимости от зазора резания и геометрии режущих частей

$$N_н = (0{,}1 \div 0{,}4)\, P_l.$$

Сила трения между опорной плитой и секцией

$$N_т = P_l f_2, \quad (19)$$

где P_l — усилие, действующее в направлении сдвига материала, приходящееся на секцию длиной l;

$$P_l = 1{,}25 l \sigma_{сд} s;$$

f_2 — коэффициент трения между плитой и матрицей; $f_2 = 0{,}15 \div 0{,}18$ (в расчетах принимают $f_2 = 0{,}15$).

Нормальная сила давления торцов деталей для прямолинейного участка контура

$$N_q = p_м F_l n, \quad (20)$$

где $p_м$ — давление торцов детали (отхода) на стенку матрицы, определяемое по формуле (11); n — число деталей, одновременно застрявших в матрице; F_l — площадь контакта детали со стенкой матрицы;

$$F_l = h_п l,$$

где $h_п$ берут из табл. 7.

Учитывая, что при односторонней резке $n = 0$ ($N_q = 0$), полное потребное усилие для смещения секции составляет

$$N_{смещ}^{max} = 0{,}4 P_l - P_l f_2. \quad (21)$$

В случае, когда режущий контур прямолинейный ($P_l = P_L$) и линия отрезки перпендикулярна к оси подачи заготовки,

$$N_{смещ}^{max} = P_l\,(0{,}4 \div 0{,}15) = 0{,}25 P_l.$$

При замкнутом контуре или с двумя противоположными рабочими контурами усилие смещения секции

$$N_{смещ}^{max} = 0{,}35 P_l - 0{,}15 P_l + p_м F_l n =$$

$$= 0{,}2 P_l + p_м h_п l n,$$

где $0{,}35 P_l$ и $0{,}15 P_l$ — принятые значения соответственно $N_н$ и $N_т$.

Смятие плиты в зоне контакта со штифтом, запрессованным в плиту на оптимальную глубину, равную $1{,}5 d_{шт}$ без изгиба штифта (идеальный случай), наступает при усилии

$$N_{смят}^{max} = 1{,}5\, [\sigma]_{смят}\, d_{шт}^2.$$

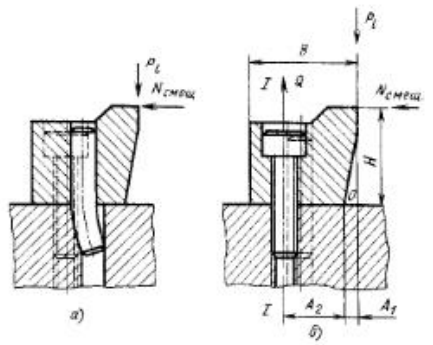


Рис. 79. Схема к определению относительной устойчивости секции

Однако в реальных условиях при смещении секции штифт изгибается (рис. 79, *а*), образуя на плите криволинейный след. Площадь проекции следа от изогнутого штифта в зоне контакта с плитой в среднем равна половине полной площади проекции штифта длиной $1{,}5 d_{шт}$, поэтому для практических расчетов силу принимают

$$N_{смят}^{прак} = 1{,}5\, \frac{[\sigma]_{смят}}{2}\, d_{шт}^2, \quad (22)$$

где $[\sigma]_{смят} = 100$ МПа — среднее допускаемое напряжение на смятие металла плиты, принятое для чугуна СЧ 25 и стали 35.

Сопоставляя $N_{смещ}$ с $N_{смят}$ с учетом числа штифтов, участвующих в соединении секции с плитой, условно пренебрегая усилием затяжки винтов, нетрудно выбрать способ фиксации секции — с помощью только штифтов или с применением дополнительной опоры.

Секция, закрепляемая винтами и штифтами в направлении, совпадающем с направлением движения рабочих частей, должна хорошо сопротивляться опрокидывающему моменту. Чем больше отношение B/H (рис. 79, *б*),

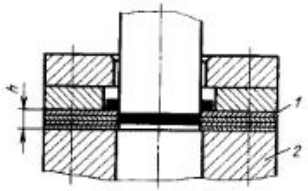


Рис. 80. Пример армирования матрицы вырубного штампа пластинами из бейнитных сталей

тем устойчивее секция. Установлено, что при расположении винтов в один ряд отношение B/H должно быть не менее 0,8, а при расстановке винтов в два ряда $B/H \geqslant 1{,}2$.

Проверочный расчет для крепежных винтов производят на основании значений опрокидывающих моментов, определяемых по следующим формулам:

$$M_O = P_l A_1; \quad M_{I-I} = QA_2,$$

где Q — необходимое полное усилие для удерживания секции от опрокидывания (за счет натяжения винтов);

$$Q = \frac{P_l A_1}{A_2}.$$

Когда секцию крепят винтами в два ряда, крепежные усилия этих винтов суммируются. Если сечение и число винтов для обоих рядов принимают равными, то

$$Q_{\text{сум}} = \frac{P_l A_1}{A_2 + A_3},$$

где A_1 — расстояние от режущей кромки секции до ее ближайшей точки (линии) опоры O; A_2 и A_3 — расстояния от точки O соответственно до первого и второго рядов винтов.

Секции, фиксируемые штифтами без дополнительной опоры, допускается применять только при выполнении разделительных операций. Для формоизменяющих штампов такой способ фиксации секций недопустим.

Совершенно иные условия работы секций, закрепляемых в штампах способом, приведенным на рис. 11. Секции удерживаются от смещения при действии отталкивающей силы $N_{\text{смещ}}$ благодаря наличию врезки, которая обеспечивает жесткую опору. В этом случае условия работы секции изменяются. Рационально, чтобы отношение B/H было значительно меньше единицы. Например, достаточно, если $B/H \leqslant 0{,}5$.

Второй и более прогрессивный способ изготовления рабочих частей с любым сложным контуром заключается в том,что заготовка из высоколегированной или инструментальной стали вначале закаливается до рабочей твердости, а затем обрабатывается на вырезных и прошивочных электроэрозионных станках. В этом случае габаритные размеры монолитной рабочей части могут достигать 300—400 мм, а сложность рабочего контура и габариты не вызывают больших трудностей при изготовлении, так как их обработка ведется автоматически электродами на станках с ЧПУ. Степень сложности конфигурации электрода не влияет на производительность электроэрозийного станка. Обработка (прожог) рабочих контуров в термообработанных заготовках осуществляется с высокой точностью, что обеспечивает полную взаимозаменяемость спариваемых рабочих деталей без выполнения слесарно-доводочных операций. Недостаток электроэрозионного метода обработки заключается в том, что разрушенный небольшой участок в цельной крупногабаритной матрице или в пуансоне при эксплуатации требует замены всей рабочей части штампа или восстановления ее с полным демонтажом.

Поиск других решений по экономии инструментальных и особенно высоколегированных сталей непрерывно продолжается. В последнее время широкое распространение получили сборные конструкции рабочих частей. Сущность этого метода заключается в изготовлении матрицы или пуансона из металла, не способного к закалке до высокой твердости с армированием его высокостойкими вставками малой массы. Особенно эффективно выполнение вырубных матриц, армированных пластинами из бейнитных сталей. Несущей основой *2* (рис. 80) может служить любой сплав металла, способный выдержать давление, возникаемое от технологического усилия. Для изготовления несущей основы приемлемы

все стали, а в некоторых случаях возможно применение алюминиевого или цинкового сплава и др. На верхней поверхности основания матрицы с помощью винтов и штифтов закрепляют тонкие пластины *1*, которые закаливают изотермической обработкой (на бейнит). Толщина одной пластины 0,8—1,5 мм, а в наборе они образуют рабочий матричный поясок h (см. табл. 10). Однако общая высота пластин определяется не только геометрическим параметром h, но и прочностью при нагружении в процессе вырубки (пробивки). Если штамп предназначен для вырубки деталей из тонкого металла ($s \leqslant 0{,}5$ мм), то может быть применена одна пластина толщиной $s \approx \approx 1$ мм, а для штамповки металла толщиной 3—5 мм этих пластин следует поставить не менее четырех. Вместо группы пластин можно изготовить одну закаленную на бейнит пластину соответствующей суммарной толщины. Применение тонких пластин упрощает технологию изготовления рабочей части, так как предоставляется возможность получать пластины вырубкой, используя для этой цели пуансон, который входит в комплект штампа. В основании матрицы предварительно разделывается сквозное окно с размерами, грубо приближающимися к контуру пуансона. Преимуществом применения тонких закаленных пластин является также продление срока службы матрицы за счет использования острых режущих кромок всех пластин путем взаимной их перестановки, не прибегая к заточке.

Одним из важных требований к штампам современного производства является обеспечение быстросменности рабочих частей. Этому вопросу уделяется особенно много внимания при оснащении штампами гибких автоматических производств, многопозиционных прессов-автоматов и всевозможных автоматических комплексов. Применение быстросменных рабочих частей необходимо также в крупногабаритных (тяжелых) штампах независимо от того, являются ли они составной частью автоматического комплекса или работают индивидуально. Задача сводится к тому, чтобы в процессе отладки и эксплуатации штампа предоставлялась возможность выполнить замену или какую-либо доводочную операцию рабочей части без демонтажа штампа. В большей степени обеспечение быстросменности требуется для относительно тонких малостойких пуансонов, когда наиболее вероятна потребность в частой их замене вследствие поломки или износа. Наиболее простой способ, обеспечивающий быструю замену пуансона, — стопорение его болтом (рис. 81, *а*). Однако, учитывая, что посадка пуансона в державку свободная (по $H7/h6$), затяжка болтом приводит к нарушению соосности его с матрицей. Поэтому данный метод приемлем в основном для тех случаев, когда односторонний режущий зазор $z > 0{,}05$ мм и требования к качеству штампуемых деталей невысокие. При зазоре $z < 0{,}05$ мм и при более высоких требованиях к качеству выполнения разделительных опе-

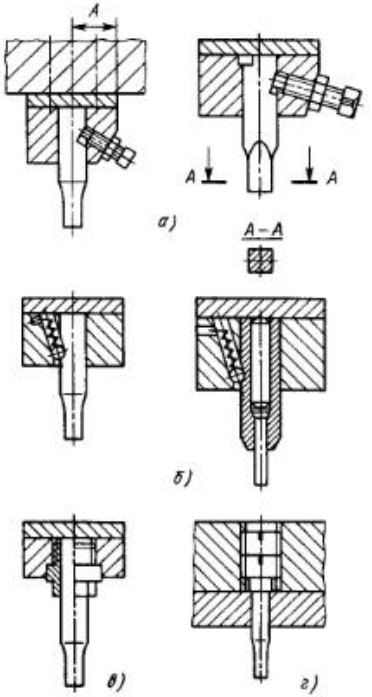


Рис. 81. Способы крепления быстросменных пуансонов

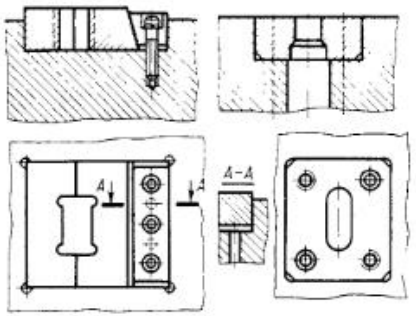


Рис. 82. Примеры применения вставных (быстросменных) матриц

рацнй быстросменное крепление осуществляют без «затяжки» пуансона болтом. В этом случае пуансоны удержнваются с помощью шарика (рис. 81, б) илн подтягиваются центральной гайкой (рис. 81, *в*), а иногда создают опору резьбовыми пробкамн (рис. 81, *г*), которые обеспечнвают возможность замены нх без демонтажа державки. Быстросменность матрнц с цнлиндрической посадкой выполняют в принципе темн же способамн, что и для пуансонов. В стационарных матрнцах с рабочими элементамн относительно малой стойкости устанавлнвают местные «вставкн» с возможностью быстрой их переустановки. Наиболее целесообразно в таких случаях применять местную врезку без дополнительной фнксацнн штифтами (рис. 82).

Толщину стенок матриц для разделительных штампов при замкнутых рабочих контурах определяют в зависимостн от величины нагрузок и способа крепления. Минимальная толщина стенки матрицы-втулки с круглым рабочим контуром прн креплении ее методом запрессовки в державку с натягом (по *H7/n6*) допускается равной $\delta \approx 0{,}1d$, где d — диаметр рабочего окна матрицы. Однако при такой толщине стенки в процессе запрессоаки в державку матрица деформируется, поэтому на основании

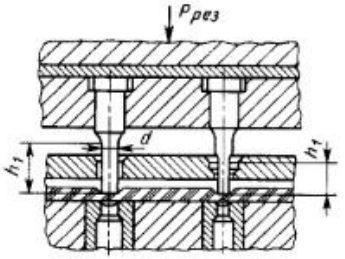


Рис. 83. Схема к расчету пуансонов на прочность

опытных данных прнннмают $\delta_{min} \approx \approx 0{,}2d$ для легкнх работ и $\delta_{min} \approx \approx 0{,}3d$ для тяжелых работ.

Свободно закрепленные на опоре (без запрессовки в державку) круглые матрицы выполняют с толщиной стенкн $\delta > 0{,}3d$.

Цельные и секцнонные матрицы для вырубкн деталей и пробивки отверстий со сложными контурами могут проверяться на прочность по всем трем координатам. Однако, учнтывая обязательное наличие несущих опорных плнт и элементов жесткой опоры, которые предохраняют рабочие части от разрушення, проверку на изгиб и сжатне матричных систем в направленнн деформнрующнх снл проводить нецелесообразно.

Расчет относнтельно тонкнх пуансонов на прочность проводят нз условня: $P_{доп} \geqslant P_{рез}$, где $P_{доп}$ — допускаемая нагрузка на сжатне; $P_{рез}$ — потребное технологнческое усилне.

Допускаемую нагрузку на сжатне и устойчнвость рабочей части пуансонов высотой h_1 (рнс. 83) определяют по формуле

$$P_{доп} = \varphi F_к [\sigma]_{сж}, \qquad (23)$$

где φ — коэффициент понижения допускаемого напряжения, завнсящнй от условной гибкости, определяемой отношением $\mu h_1 / i_{min}$ [μ — коэффициент приведенной длины, характеризующий способ закрепления (заделки) конца стержня и принимаемый равным 0,7];

$\frac{\mu h_1}{i_{min}}$	До 4	Св. 4 до 8	Св. 8 до 12	Св. 12 до 16	Св. 16 до 23	Св. 23 до 30
φ	1,00	0,80	0,75	0,72	0,65	0,60;

i_{min} — мнннмальный раднус нннерцин сечения рабочей части пуансона;

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J}{F_{сеч}}} \qquad (24)$$

(J — минимальный осевой момент инерции поперечного сечения рабочей части пуансона; $F_{сеч}$ — площадь поперечного сечения рабочей части пуансона; $F_к$ — площадь контакта рабочего торца пуансона со штампуемым материалом); $[\sigma_{сж}]$ — допускаемое напряжение на сжатие с запасом прочности 1,5—2 (для группы инструментальных сталей типа У8А, У10А и др. принимают $[\sigma_{сж}] = 1600$ МПа; для группы высоколегированных сталей типа Х12М, 9ХС и др. $[\sigma_{сж}] = 1900$ МПа).

В частности, для пуансона круглого сечения минимальный радиус инерцин

$$i_{min} = \sqrt{\frac{\pi r^4}{4} \Big/ \pi r^2} = \frac{r}{2} = 0{,}25d.$$

При $s/d \geqslant 1$ (s — толщина штампуемого материала)

$$F_к = F_{сеч}; \qquad (25)$$

при $s/d < 1$ площадь контакта $F_к$ прнннмают условно равной площади пояска шириной 0,5s по всему периметру рабочего торца пуансона:

$$F_к^{усл} = \pi s (2d - s)/4. \qquad (26)$$

3. ГИБОЧНЫЕ ШТАМПЫ

Наиболее распространенные формы контура (в полости гибкн) деталей, для изготовленнЯ которых обычно прнменяют штампы, прнведены на рис. 84 (P — усилне гибкн; его направленне определяет положенне заготовки и детали в штампе).

Форма инструмента для штамповки деталей с V-образным контуром показана на рнс. 85.

Гибку без правкн полок (рис. 85, *а*) прнменяют, когда допускается иепрямолннейность участка контура, примыкающего к участку гибки [см. гл. 3, формулы (85)—(88) и рис. 22 и 23]. В частности, в штампах для кромкогибочных прессов (рис. 86) правку полок не выполняют. Угол φ_1

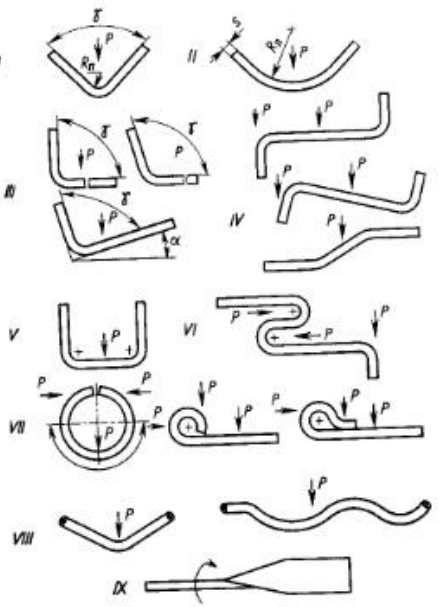


Рис. 84. Разновидности (*I*—*IX*) деталей по изгибу, получаемых в штампах

должен быть больше угла φ_2. Значение угла $\alpha_д$ можно приблизнть к значению $\alpha_м$ нли $\alpha_п$ настройкой рабочего хода u штампа.

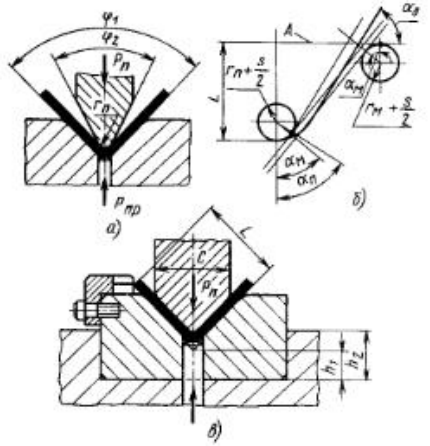


Рис. 85. Варианты сочетания рабочих частей штампов для V-образной гибки

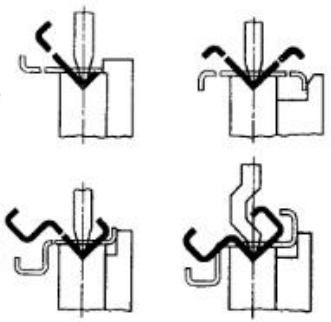


Рис. 86. Примеры гибки в штампах на кромкогибочных прессах

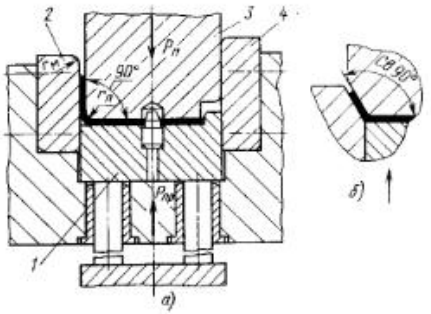


Рис. 88. Одноугловая (L-образная) гибка (полкой вверх) с защемлением исходной заготовки в горизонтальном положении

Правка полки (рис. 85, *в*) требует значительного увеличения усилия штамповки [см. гл. 3, формулы (91) и (92)].

Прижимное устройство штампа обеспечивает прижим заготовки к пуансону с усилием $P_{пр} \geqslant P_м$ [см. гл. 3, формулу (85)] и предотвращает горизонтальное смещение заготовки относительно пуансона, снижающее точность размера L детали.

Другие формы инструмента для деталей с V-образным контуром показаны на рис. 87 и 88.

Процесс гибки начинается только после защемления части заготовки с помощью прижима *1* (рис. 87, *а*), после чего свободная часть заготовки отгибается матрицей *2* на заданный угол. Усилие прижима $P_{пр}$ должно быть достаточным для обеспечения плоскостности защемленной полки детали $P_{пр} \geqslant P_{сд}$ [см. гл. 3, формулу (59)]. При недостаточном усилии прижима работа штампа производится до смыкания прижима *1* с верхней плитой, сопровождаемого правкой полки. Обязательным условием надежной работы штампа является наличие противоотжима *4* для матрицы *2*.

При расположении инструмента, показанном на рис. 88, *а*, матрица *2* в процессе работы штампа остается неподвижной, а пуансон *3* совершает возвратно-поступательное движение от ползуна пресса. В этой схеме противоотжим *4* необходим для пуансона.

Из сопоставления расчетной схемы при выводе формул для расчета усилий и формы инструмента [см. гл. 3, формулы (89), (96)], показанных на

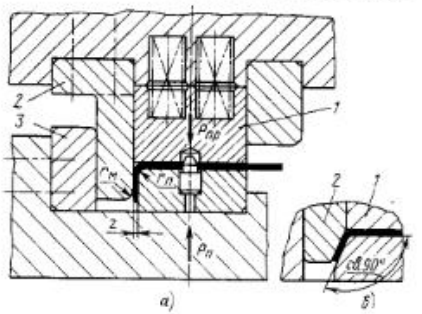


Рис. 87. Одноугловая (L-образная) гибка (полкой вниз) с защемлением исходной заготовки в горизонтальном положении

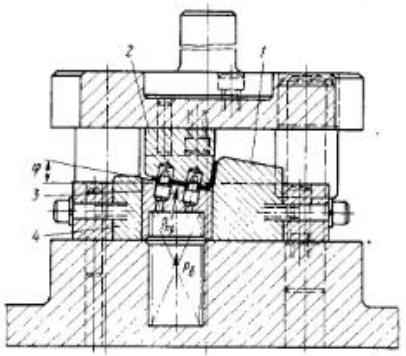


Рис. 89. Одноугловая (L-образная) гибка с защемлением исходной заготовки в наклонном положении

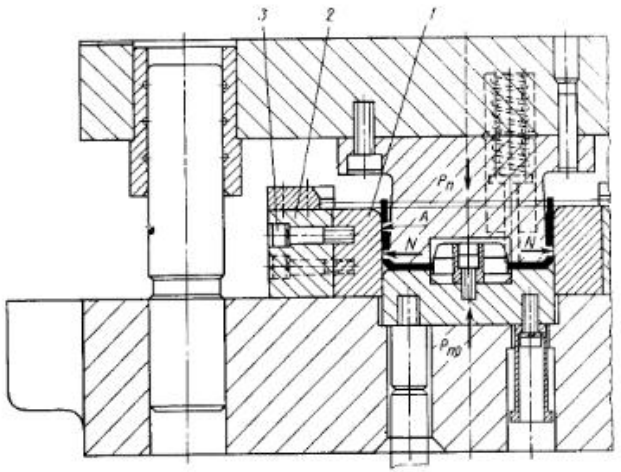


Рис. 90. Разрез типовой конструкции штампа для U-образной гибки листовой заготовки

рис. 87, *а* и 88, *а*, видно, что найденные по этим формулам значения $P_п$ и $P_{пр}$ необходимо умножить на 0,5. Если угол L-образного контура детали больше 90° (см. рис. 87, *б* или 88, *б*), принимают расчетную схему, показанную на рис. 24, и расчет ведут по формулам (89)—(92) (см. гл. 3), вводя множитель 0,5.

Конструкция, обеспечивающая защемление заготовки на наклонной плоскости (рис. 89), позволяет получить более точный угол изгиба по сравнению с конструкциями, приведенными на рис. 88, так как при отладке штампа можно учесть пружинение корректировкой углов рабочих элементов матрицы *1*, пуансона *2* и прижима *3*. Кроме того, при наклонном расположении заготовки предоставляется возможность осуществлять правку одновременно обеих полок. Противоотжим *4* служит опорой для прижима *3*. Матрица *1* также должна иметь жесткую опору. Усилия определяются по формулам (89)—(92), приведенным в гл. 3; при этом вводят коэффициент 0,5. Если угол φ значительный, считают, что $P_б = P_{пр} \cos \varphi$.

Штампы для гибки деталей с U-образным контуром (рис. 90) содержат рабочие элементы, аналогичные рассмотренным (см. рис. 87 и 88). Но в этих штампах обычно имеет место симметричное нагружение системы заготовка — штамп относительно вертикальной плоскости. Поскольку при работе штампа возникают большие распорные усилия N, рабочие стенки матрицы должны иметь жесткую опору, обладающую достаточной прочностью. Матрицу, как правило, делают секционной, это упрощает ее изготовление и эксплуатацию. Рабочая полость матрицы, подвергаясь истиранию, быстро теряет необходимую размерную точность, и процесс «восстановления» (шлифования) поверхности A цельной матрицы становится практически невозможным. Секции *1* матрицы закрепляют в жесткую обойму *2* с направлением винтов крепления *3*, совпадающим с направлением силы N, или заглубляют (врезают) в плиту блока штампа (см. рис. 103). Усилия $P_п$ и $P_{пр}$ определяют по формулам (89)—(96), приведенным в гл. 3.

Гибочные штампы проектируют с учетом пружинения материала. Способы компенсации пружинения разделены на две основные группы.

Первую группу образуют способы, основанные на корректировке угла изгиба на угол пружинения (см. гл. 3). При гибке деталей с V-образным контуром, если предусмотрена правка,

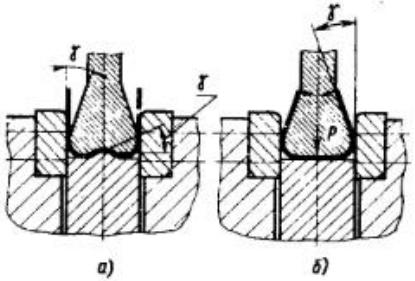


Рис. 91. Способ устранения пружинения U-образной детали при гибке

корректируют угол рабочих частей инструмента. При гибке деталей с U-образным контуром выполняют поднутрение боковых рабочих сторон пуансона на угол $\gamma = 0°\,30' \div 1°$ (см. рис. 91). Этот способ достаточно эффективен только для относительно толстых металлов ($s > 3$ мм) и имеющих относительно небольшое значение $\sigma_т/E$. Для тонких металлов и металлов с относительно большим значением $\sigma_т/E$ (для всех толщин) рекомендуется выполнять перегиб основания детали на угол $\gamma = 1 \div 3°$ (рис. 91, *а*) с последующей правкой (рис. 91, *б*); значение угла γ уточняют при отладке штампа.

Ко второй группе относятся способы, основанные на подчеканке заготовки в зоне гибки. Например, рационально в процессе гибки U-образных деталей толщиной $s \geqslant 1{,}5$ мм чеканить (выдавливать) в их основании неглубокие канавки (см. гл. 22, рис. 6).

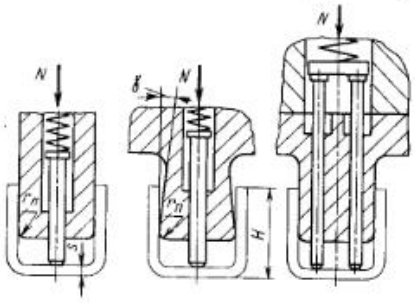


Рис. 92. Схема к определению усилий съема с пуансона U-образной детали

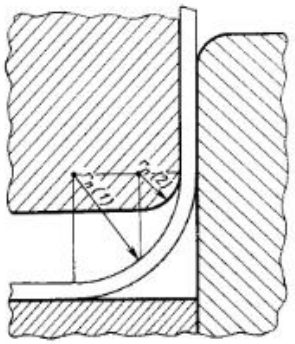


Рис. 93. Схема ступенчатого изменения кривизны изгиба детали

В результате компенсации пружинения U-образная деталь может плотно охватывать пуансон. Поэтому в штампах обычно предусматривают съемники.

Усилие съема детали с пуансона рассчитывают исходя из предположения, что штампуемая деталь плотно прилегает к пуансону и при съеме необходимо преодолеть силу трения.

Усилие съема детали с пуансона (рис. 92) определяют по формулам

$$N_{max} = \frac{2M\mu}{r_п + s\,(1-\mu)/2};$$

$$N_{min} = \frac{2M\mu}{H - s\,(1+\mu)/2},$$

где $M = \sigma_т W$ — момент упругого изгиба детали (W — момент сопротивления ее поперечного сечения); μ — коэффициент трения.

Наибольшую кривизну $1/r_м$ изгиба заготовки определяют по условию недопустимости разрыва металла [см. гл. 3, формулы (67)—(70)]. Если заданная кривизна не отвечает этому условию, выбирают (подбирают) такую схему приложения внешних сил, которая приводит к увеличению пластичности металла за счет повышения гидростатического давления. Простой способ повышения гидростатического давления при гибке U-образных деталей состоит в ступенчатом увеличении кривизны $1/r_п$ при введении дополнительных операций (рис. 93). Установлено, что отношение кривизны на второй ступени к кривизне на первой ступени должно быть таким, чтобы $r_п\,(1)/r_п\,(2) \leqslant 2$.

Радиус закругления рабочих кромок матрицы $r_м$ имеет большое значение в работе штампа и в значительной степени влияет на его стойкость и качество штампуемой детали. Величину $r_м$ назначают в зависимости от схемы гибки, высоты полок штампуемой детали и от толщины исходного материала [см. гл. 3, формулы (101)—(102)]. При этом следует учитывать, что стойкость матрицы и качество поверхностн штампуемой деталн тем выше, чем меньше контактное напряжение в зоне контакта штампуемого материала с рабочими кромками, и, следовательно, тем выше, чем меньше кривизна $1/r_м$. Особенно это касается штампов для гибкн U-образных деталей из толстолистового металла (или L-образных деталей при горизонтальном расположении одной полки), когда вследствие значительной кривизны $1/r_м$ могут возникнуть контактные напряжения, значительно превышающие предельные.

Работоспособность гибочного штампа н качество изгибаемых деталей во многом завнсят также от относительной протяженности поверхностей, предназначенных для правки элементов контура детали, ие подлежащих гибке. Рекомендации по выбору этих поверхностей приведены в гл. 3.

При гибке V-образных деталей в случаях, когда применение прижимного устройства затруднительно, для того чтобы не было значительного снижения точности детали из-за смещения заготовки относительно пуансона, сокращают глубину матрицы и протяженность поверхностей для правки и увеличивают кривизну $1/r_м$ (если на детали допускаются следы вдавливания кромок матрицы).

Если матрицу выполняют цельной (см. рис. 85), во избежание концентраторов напряжения ее осиование выполняют по радиусу $r_м$, т. е. рабочне плоскости сопрягают с поверхностью, имеющей кривизну $\sim 1/r_м$. В секционной матрице рабочне плоскостн ие сопрягают, еслн в этом нет необходимости, связанной с требованиями технологии штамповки (см. рис. 100).

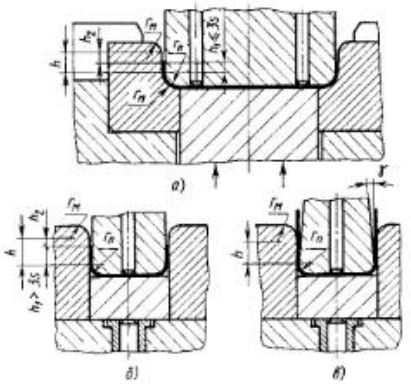


Рис. 94. Геометрия рабочих частей штампов для U-образной гибкн в завнсимости от высоты полок

Ширина C пуансона в зоне непосредственного контакта со штампуемой деталью не должна выходить за пределы участков матрицы, предназначенных для правки детали.

В штампах для гибки U- и L-образных деталей, имеющих относительно небольшое значение h_1/s (рис. 94, *а*), принимают завышениую кривизну $1/r_м$ кромки матрицы, так как при малой кривизне концы заготовки остаются без опоры. Так, при $h_1 \leqslant 0{,}5s_1$ практически нельзя построить дугу радиусом $r_м > 0{,}5s$. При $3s > h_1 > 0{,}5s$ принимают $r_м \approx h_1$.

В случае, когда $h > s$, ограничение кривизны $1/r_м$ отпадает; при этом прнннмают $r_м/s = 7$, так как дальнейшее увеличение отношения $r_м/s$ не дает существенного увелнчения качества детали и стойкости штампа.

При гибке деталей из металлопластов увеличение отношения $r_м/s$ бывает неизбежным.

В случаях, когда невозможно создать достаточное усилие пржима $P_{пр}$, гибку U- и L-образных деталей осуществляют с правкой элемента, получившего исправление. В частности, прн $h_1 \leqslant 3s$ правится не только элемент, не подлежащий изгибу, но также и участок гибки (рис. 94, *а*). При этом берут $h = h_1 + h_2$, где $h_2 \approx 3 \div 5$ мм.

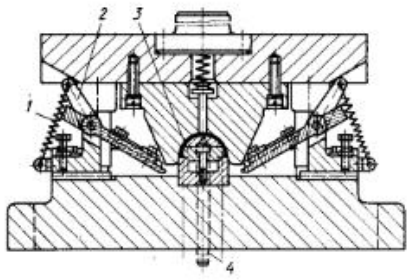


Рис. 95. Схема гибки П-образной детали с верхним расположением матрицы

При гибке по схеме, приведенной на рис. 94, *б* ($h_1 > 3s$), участок изгиба не правится, но полка полностью заглубляется в матрицу. Этот метод применяют при высоких требованиях к прямолинейности полок.

Зазор z между пуансоном и матрицей назначают в зависимости от относительной высоты полок детали и геометрии рабочих частей штампа:

при гибке по схеме, показанной на рис. 94, *а*,

$$z = s_{\min} \text{ при } h_1 \leqslant 3s;$$

при гибке по схеме, показанной на рис. 94, *б*,

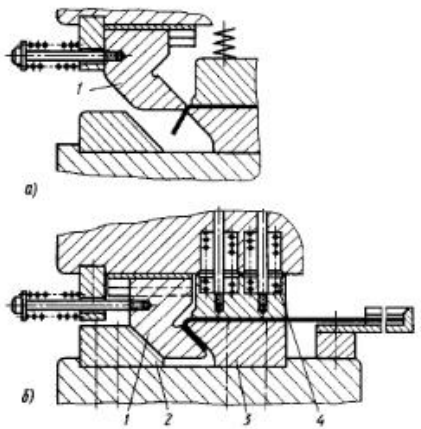


Рис. 96. V-образная гибка с матрицей-ползушкой и защемлением заготовки в горизонтальном положении

$$z = s_{\text{ном}} \text{ при } s < 3 \text{ мм}, h_1 > 3s;$$

$$z = s_{\max} \text{ при } s > 3 \text{ мм}, h_1 > 3s;$$

в конструкциях с поднутрением пуансона (рис. 94, *в*)

$$z = s_{\min} \div s_{\text{ном}} \text{ при } h_1 > 3s.$$

В особых случаях зазор z меньше толщины штампуемого материала.

Схемы штампов, приведенные на рис. 84—94, дают достаточное представление о конструкциях рабочих частей штампов для гибки V-, U- и L-образных деталей. Однако в практике конструирования имеется много частных решений. Рассмотрим некоторые из них.

Пример 1 (рис. 95). V- или U-образная гибка с расположением деталей полками вниз. Заготовку укладывают на шарнирно закрепленные фиксаторы *2*, которые поддерживаются пружинами растяжения *1*. Пуансон *3* выполнен из двух составных частей, верхняя часть — подвижная. Опираясь на буфер через шпильки *4*, верхняя часть пуансона обеспечивает отлипание и подъем согнутой детали. При такой конструкции пуансона легче решаются вопросы загрузки заготовки и удаление готовой детали, что особенно важно в условиях автоматизированного производства. Одновременно создаются лучшие условия для периодической очистки матрицы от загрязнения.

Пример 2. В случаях, когда одна полка V-образной детали относительно длинная, заготовку укладывают в горизонтальном положении. Соответствующий штамп оснащают подвижной матрицей *1* (рис. 96), выполненной в виде ползушки (составной или цельной). При опускании верхней части штампа конец заготовки сначала изгибается на 90° (рис. 96, *а*), после чего матрица *1*, контактируя с клином *2*, сгибает заготовку под острым углом по пуансону *3* (рис. 96, *б*). Заготовка в процессе гибки постоянно удерживается пружинами *4*.

Пример 3. *Изгиб заготовки на угол 180° ($r_{\text{п}} = 0$) «до смыкания сторон»* (рис. 97) надежно осуществляется за три операции: получение угла 90° (на рисунке не показано); подгибка одной полки на угол $\alpha \approx 45°$

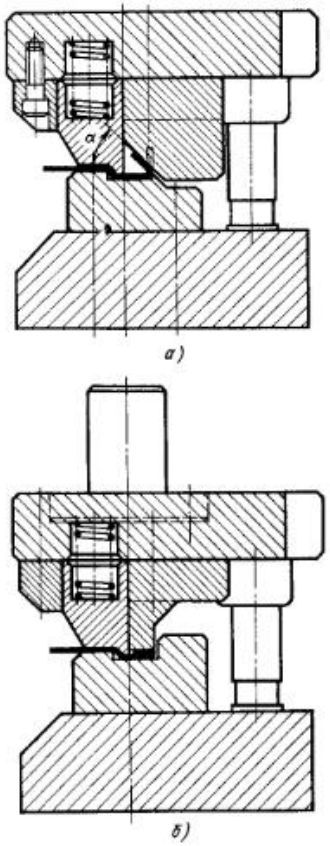


Рис. 97. Изгиб заготовки «до смыкания сторон» (на угол 180°)

(рис. 97, *а*) и окончательный изгиб с правкой (рис. 97, *б*).

Пример 4. *Гибка угольника с применением в штампе шиберного устройства* (рис. 98). Ранее полученные заготовки пачками укладывают вручную в магазин-накопитель *3* и по одной штуке за каждый ход пресса сдвигаются шибером *2* в направлении к матрице. Магазин устанавливают в безопасной зоне от матрицы, на расстоянии, кратном шагу подачи. В промежутке между магазином и матрицей заготовки удерживаются с помощью пружин *4*. Конструкция ползушки *6* шиберного механизма обеспечивает возможность закрепления на ней шибера *2* перед магазином. Ступенчатый (двойной) клин *5*, взаимодействуя с ползушкой, осуществляет возвратно-поступательное движение шибера. Согнутые детали сбрасываются с матрицы стержнем *1* и удаляются из штампа. Рекомендуемая толщина штампуемого материала $s \geqslant 1$ мм.

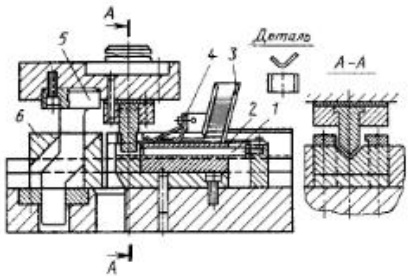


Рис. 98. Штамп для гибки угольника, оснащенного шиберным питателем

Пример 5. *Штамповку из ленты многогранной оболочки* (рис. 99) осуществляют путем последовательного перегиба ленты на угол α, равный углу грани. В зависимости от пластических свойств штампуемого металла значения угла α на рабочих частях *2* и *3* штампа для гибки уточняют с учетом пружинения заготовки. В процессе штамповки в этом случае представляется возможным производить «подналадку» величины изгиба изменением положения пуансона *1* в вертикальном направлении. Если штампуемый материал обладает повы-

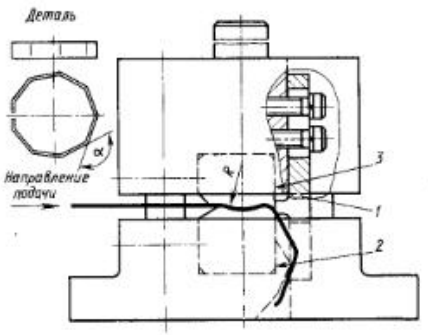


Рис. 99. Штамповка многогранного кольца путем последовательного изгиба заготовки

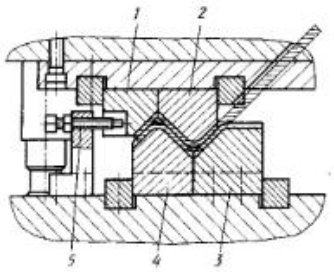


Рис. 100. Штамп для гибки Z-образной детали

шенной упругостью, то прямолинейность грани оболочки достигается за счет введения кривизны с радиусом R в рабочих частях *2* и *3*. Размер R устанавливают опытным путем.

Пример 6. *Гибка Z-образных деталей* требует от конструкции штампа возможности выполнения одновременно двух изгибов в заготовке (рис. 100). Рабочие части *1* и *2* пуансона, а также *3* и *4* матрицы выполняют секционными, что облегчает процесс сборки и отладки штампа. С этой же целью предусматривается регулируемый упор *5*.

Пример 7. *Штамп с жестким съемником.* Если высота полок детали малая ($h_1 \leqslant 3s$), то достаточно применять съемник («козырек») с одной стороны (рис. 101), а если $h_1 > 3s$, то необходимо наличие съемников с двух сторон.

Пример 8. *Штампы для гибки U-образных деталей из круглого проката* в принципе не отличаются от штампов для гибки деталей из плоских заготовок. Пуансон *2*, секции матрицы *3* и прижим *4* выполняют с полукруглыми канавками (рис. 102). Съем изогнутой заготовки с пуансона в приведенной конструкции осуществляется жестким съемником *1*. Фиксация заготовки регулируемая.

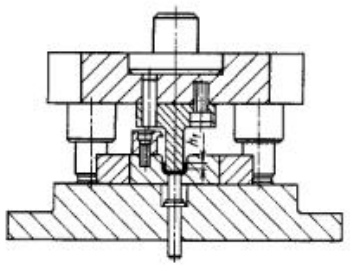


Рис. 101. U-образная гибка с применением одностороннего (жесткого) съемника

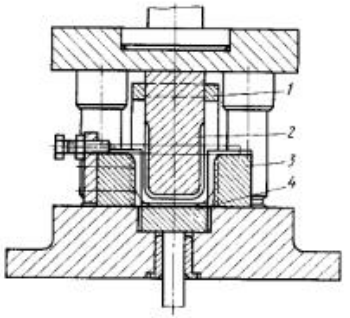


Рис. 102. Штамп с жестким съемником для U-образной гибки заготовки из прутка

Пример 9. *Штамп для гибки U-образной детали из трубы или прутка круглого стержня с применением роликов 2* (рис. 103), успешно заменяющих неподвижную матрицу. Защемление заготовки прижимом *4* обеспечивает сохранение прямолинейности осиования штампуемой детали и предотвращает сползание заготовки. Пуансон *1*, по аналогии с роликами, выполнен с канавкой по радиусу заготовки. Съем готовой детали осуществляется механическим толкателем пресса. Ролики *2* смонтированы на основании *3* (цельном или двухсекционном), которое одновременно является продолжением матрицы. Учитывая наличие относительно большого радиуса детали по внешней стороне, необхо-

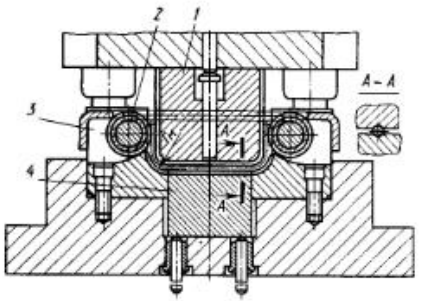


Рис. 103. Штамп для U-образной гибки заготовки из прутка с применением роликов в матрице

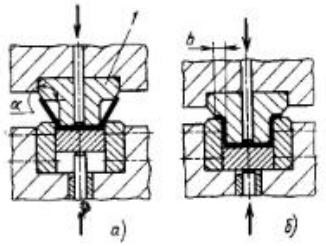


Рис. 104. Разрез конструкции штампа для Ω-образной гибки деталей с полкой шириной $b \leqslant 5s$

димо вести процесс с применением правки (удара) по $r_м$.

Пример 10. *Гибка Ω-образных деталей.* Трудность получения деталей подобной формы заключается в том, что в процессе формоизменения горизонтально расположенные полки защемляются между рабочими частями, и происходит растяжение концов заготовки. При $b \geqslant 5s$ (рис. 104, *б*) практически невозможно получить деталь с заданными размерами за одну операцию при наличии традиционной жесткой матрицы. Как исключение, при невысоких требованиях к размерам горизонтальных полок можно согнуть Ω-образную деталь, у которой $b < 5s$. В этом случае фланец пуансона *1* выполняется под некоторым углом α (рис. 104, *а*). Однако лучшего

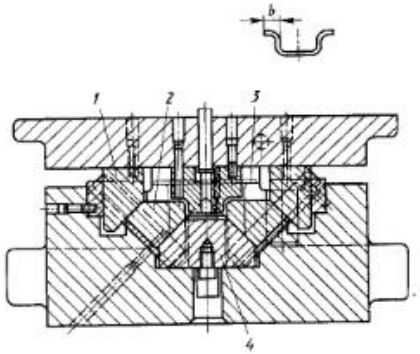


Рис. 105. Разрез конструкции штампа для Ω-образной гибки деталей с полкой шириной $b > 5s$

результата достигают, когда в конструкции штампа предусмотрены подвижные секции матриц *2* (рис. 105). В кинематической связи с клиньями *1* и прижимом *4* штампуемая заготовка *3* постепенно приобретает Ω-образную форму. Данная схема обеспечивает хорошее качество штампуемых деталей с горизонтальными полками не только при $b < 5s$, но также и при $b > 5s$.

Пример 11. *Окончательную (последнюю) операцию гибки деталей типа хомутиков* и других подобных форм при раздельной (пооперационной) штам-

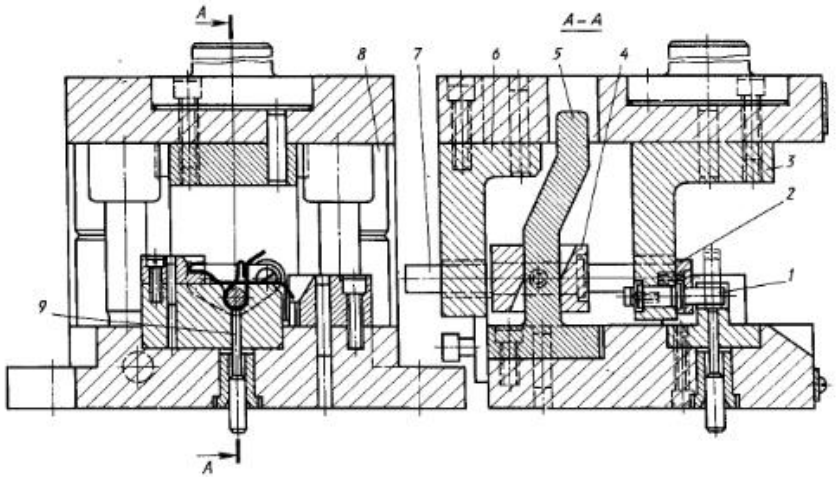


Рис. 106. Гибка деталей типа хомутиков с механизацией съема отштампованной детали

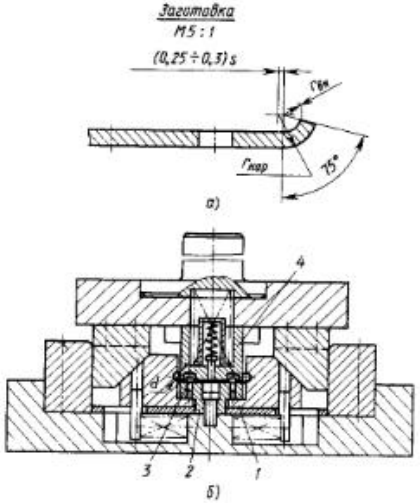


Рис. 107. Завивка спаренной петли

повке производят после выполнения предварительной гибки. Типовая конструкция соответствующего штампа приведена на рис. 106. Пуансон-оправку *1* монтируют в кронштейн *3*, жестко закрепленный к верхней плите. Готовая деталь (после гибки) снимается с пуансона *1* клиновым механизмом. Каретка *4* с встроенными в нее двумя скалками *7* в процессе работы штампа взаимодействует с клином *5*. Скалки *7* со свободной посадкой входят в отверстия кронштейнов *3* и *6*. На концах скалок *7* встроен сбрасыватель *2*. При подъеме ползуна каретка движется вправо, сбрасыватель сталкивает с пунасона *1* готовую деталь. В процессе гибки (свертывания) штампуемая деталь постоянно прижимается к пуансону *1* толкателем *9* от буфера пресса. Обязательным условием надежности работы штампа является применение ограничителей закрытой высоты *8*.

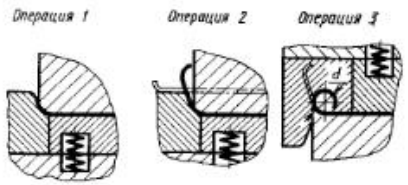


Рис. 108. Схемы переходов завивки ушка петли при $d \geqslant 5s$

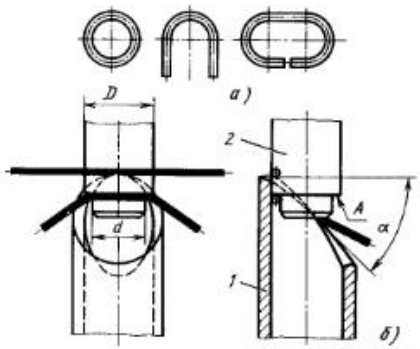


Рис. 109. Схема штамповки колец в геликоидном штампе

Пример 12. *Завивка петель.* Наиболее рационально выполнять завивку «ушка» одновременно в двух спаренных горизонтально расположенных петлях при встречном сближении двух идентичных матриц (рис. 107). В этом случае обрабатываемая заготовка должна иметь предварительно подготовленные концы (рис. 107, *а*), которые могут формироваться во время ее вырубки. Наличие отверстий в заготовке (что характерно для петель) создает условия для надежной фиксации с помощью фиксаторов *3* (рис. 107, *б*), встроенных в неподвижную опору *2*. В сочетании с подпружиненным прижимом *4* фиксаторы *3* осуществляют защемление детали, обеспечивая стабильность ее положения на всем пути движения ползушек-матриц *1*.

Пример 13. *Завивку ушка петли при* $d \geqslant 5s$ наиболее целесообразно выполнять за три операции (рис. 108).

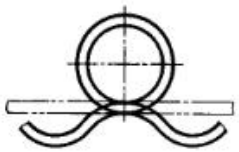
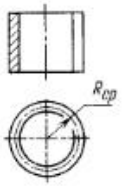
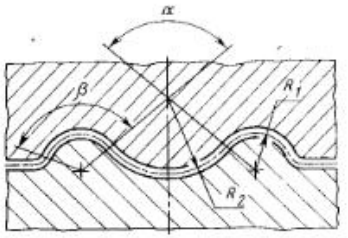


Рис. 110. Форма переходов штамповки втулки с применением реверсивной гибки

12. Варианты построения контура рабочих частей гибочного штампа для реверсивной гибки

Вариант	Форма втулки	Построение контура пуансона и матрицы	$R_1/R_{ср}$	$R_2/R_{ср}$	$\alpha°$	$\beta°$
I			1	1,5	100	105
II			0,9	1,4	108	120
III			0,85	1,3	114	130
IV			0,8	1,2	120	140

Пример 14. *Получение кольцеобразных деталей.* Простейшая конструкция штампа для получения деталей кольцеобразной формы из проволоки представлена на рис. 109, *а*. Матрица *1* (рис. 109, *б*) выполнена со сквозным отверстием, диаметр которого равен диаметру детали по наружному контуру. Торец матрицы (в виде цилиндра) срезан по винтовой линии с углом подъема $\alpha = 40 \div 60°$. Угол пересечения винтовой и цилиндрической поверхностей поверхностью полости матрицы заваливают по сопрягающей их поверхности, выполняющей роль рабочей кромки. Началом изгиба служит верхний край рабочей полости матрицы. Прямолинейную заготовку из проволоки подают к этому краю. Пуансон *2* состоит из двух ступеней. Большее его сечение (условный диаметр *D*) соответствует внешнему контуру штампуемой детали и стыкуется с соответствующим отверстием матрицы по *H8/f9*. Меньшая ступень (условный диаметр *d*) соответствует внутреннему контуру штампуемой детали. Если штампуемое кольцо плоское, то опорную часть уступа *A* в пуансоне выполняют плоской, перпендикулярно к продольной оси. Если требуется получить кольцо с некоторой кривизной, то уступ в пуансоне должен иметь такую же кривизну. В процессе заглубления пуансона заготовка постепенно втягивается в матрицу, на выходе из которой образуется заданная деталь (кольцо). Точность таких деталей невысокая.

Пример 15. *Штамповка свертных втулок с применением реверсивной гибки.* Этим методом получают детали с невысокими требованиями к их геометрии и точности размеров. Прямолинейная заготовка вначале изгибается волнообразно в противоположных направлениях (рис. 110), после чего в положении выпуклой частью вверх свертывается во втулку. Процесс свертывания в штампе осуществляется с применением оправки (из-за простоты конструкций оба штампа не показаны). Рекомендации для построения рабочих контуров матрицы и пуансона приведены в табл. 12. Вариант I рекомендуется при штамповке высокопластичных металлов типа стали 08ВГ, 10кп, алюминия и др.; вариант II — для сталей типа 15кп, 20пс, 25 и др.; вариант III — для сталей типа 30, 35; вариант IV — для сталей типа 40, 45, 65Г 30ХГС и др.

Пример 16. *Гибка стержня круглого сечения* (толстостенной трубы) с применением V-образного инструмента при доведении его при гибке до полного смыкания практикуется в тех случаях, когда концы заготовки не касаются деталей верхней части штампа и ползуна пресса, т. е. при обеспечении

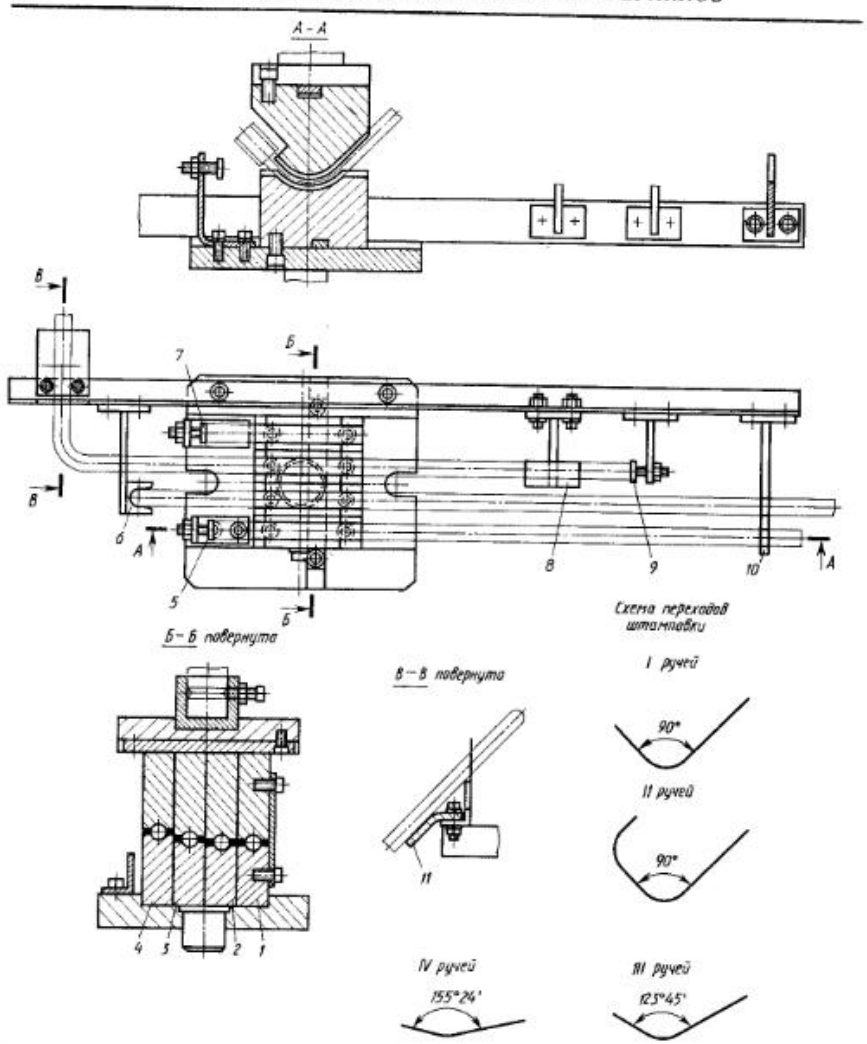


Рис. 111. Четырехручьевый штамп для свободной гибки трубы

беспрепятственного движения наиболее отдаленных точек заготовки по заданной траектории. На рис. 111 приведена конструкция штампа для четырех изгибов стержня под различными углами, которые выполняются последовательно в четырех (*I*—*IV*) ручьях. Заготовку укладывают в рабочие ручьи секций матрицы *1*—*4* поочередно спереди назад с фиксацией одного конца по соответствующим упорам *5*, *6*, *7* и *9*. В зависимости от формы и длины заготовки, а также от направления изгиба дополнительно устанавливают поддержки. В ручьях *I* и *II* применена поддержка *10* на прямолинейных участках стержня, а для ручьев *III* и *IV* — поддержки *8* и *11* в зоне ранее отогнутых концов. Рабочие ручьи секций матрицы и пуансона заглублены

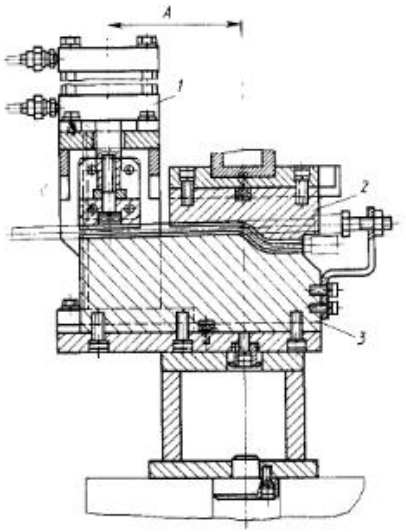


Рис. 112. Штамп для гибки трубы с применением пневмоцилиндра для зажима заготовки

с учетом охвата половины сечения стержня. Если невозможно или небезопасно изгибать стержень с применением V-образного инструмента (при большой длине стержня и при относительно большой его жесткости), применяют гибку с защемлением (прижимом) заготовки. Для этого наиболее целесообразно встраивать пневмоцилиндр *1* (рис. 112), неподвижно закрепленный к нижней части штампа. Пневмоцилиндр размещают на некотором расстоянии *А* от пуансона *2* и матрицы *3*, обеспечивающим работоспособность и компактность конструкций прижима и рабочих частей штампа.

Пример 17. Гибка полки детали с ребрами жесткости из заготовки, предварительно формоизменной в вытяжном штампе.

Если формоизменение листовой заготовки осуществляют с применением операции вытяжки и гибки, то оба процесса выполняются раздельно: вначале вытяжка из плоской заготовки, затем гибка. На рис. 113 показан пример гибки одной полки детали с применением заготовок после вытяжки центральной полости. Вставка *2* выполнена с выступами для получения

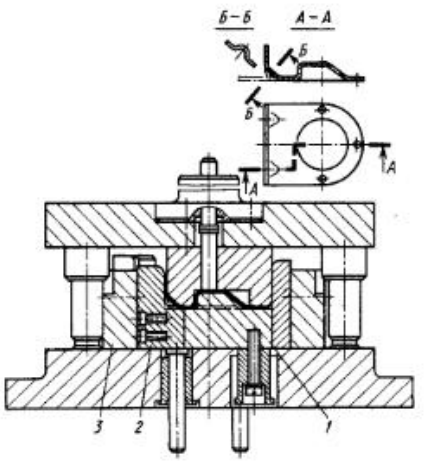


Рис. 113. Штамп для гибки полки детали в заготовке, ранее подвергнутой вытяжке

ребер жесткости в штампуемой детали. Прижим *1* (показан в плане) состыкован с выступами вставки *2*. Все рабочие части низа штампа размещены в жесткой обойме *3*.

Пример 18. *Штамп для скручивания полосы.* При скручивании полосы на угол более 60° применяют поворотные механизмы. На рис. 114 приведена конструкция штампа для скручивания полосы на угол 90° с применением шестеренно-реечного привода. Заготовку укладывают в штамп «на ребро». Один ее конец вставляют в паз поворотной оправки *1* с опорой *2*, а второй свободно укладывают на опору *4*. В исходном положении паз оправки *1* располагается вертикально. До начала

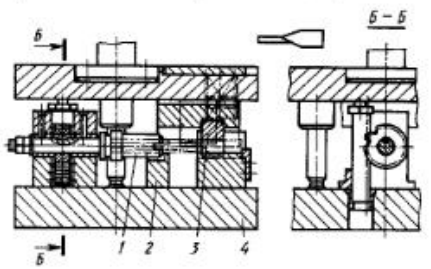


Рис. 114. Разрез конструкции штампа для скручивания прямоугольной заготовки на угол $\alpha = 90°$

поворота оправки подпружиненная матрица *3*, опускаясь, охватывает своим пазом штампуемую заготовку. При дальнейшем опускании ползуна пресса ресчный механизм разворачивает заготовку на требуемый угол. При подъеме ползуна механизм скручивания возвращает оправку *1* в исходное положение.

4. ШТАМПЫ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ

Требования к штампам для первой операции вытяжки. В зависимости от конструкции пресса и схемы штамповки операцию вытяжки производят в положении детали дном вверх (преимущественно на прессах простого одинарного действия) или вниз дном (преимущественно на прессах двойного или тройного действия). Конструкция штампов для первой вытяжки при отношении $D_{заг}/d_{выт} > 1{,}2 \div 1{,}3$ должна, прежде всего содержать элементы, обеспечивающие устойчивость штампуемой заготовки во время всего процесса ее формоизменения. Основным средством для обеспечения выполнения этой задачи для большинства конструкций вытяжных штампов служит прижим (складкодержатель, который должен надежно прижимать заготовку к «зеркалу» матрицы).

В штампе, представленном на рис. 115, прижим *4* работает от буфера пресса. Передаточным звеном между буфером и прижимом служат толка-

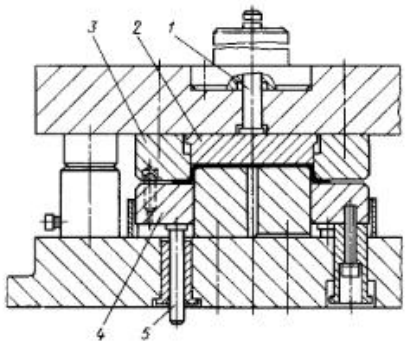


Рис. 115. Штамп для вытяжки с применением гладкого прижима (складкодержателя)

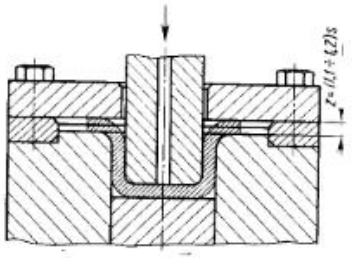


Рис. 116. Упрощенная конструкция штампа для вытяжки с применением жесткого складкодержателя

тели *5*. Готовая деталь удаляется из матрицы *3* в конце подъема ползуна с помощью выталкивателя *2*, приводимого в действие механическим толкателем пресса через толкатель *1* штампа. Роль привода выталкивателя могут выполнять пружины. В большинстве случаев в штампах для первой вытяжки выталкиватель *2* при смыкании штампа осуществляет правку дна детали. Между прижимом *4* и нижней плитой штампа должен быть зазор (обычно 5—10 мм).

В штампах для прессов двойного или тройного действия усилие на складкодержателе создается внешним ползуном (см. рис. 118 и 137). В упрощенной схеме штампа с жестким (щелевым) складкодержателем между складкодержателем и матрицей (рис. 116) должна быть равномерная щель $z = (1{,}1 \div 1{,}2)\,s$. Прижим-складкодержатель в вытяжных штампах является универсальным средством торможения листового материала в процессе вытяжки. По требованию технологического процесса он применяется в двух основных исполнениях: гладким и с введением в него дополнительных средств (ребер или порогов), которые усиливают торможение заготовки. Большинство листовых деталей малых габаритов (ориентировочно с наибольшим размером в плане до 200 мм) при толщине материала $s \leqslant 2$ мм и детали с любым габаритом при толщине $s > 2$ мм вытягивают в штампах с гладким складкодержателем.

Крупногабаритные тонколистовые детали при толщине металла $s \leqslant 2$ мм в осиовном вытягивают в штампах

с применением дополнительных средств торможения.

При большом периметре наружного контура штампуемой детали и наличии нескольких рядов ребер могут возникать нагрузки, превышающие усилие буфера пресса (или усилия наружного ползуна на прессе двойного действия), поэтому сфера применения перетяжных ребер ограничивается толщиной штампуемого материала.

При работе над конструкцией штампа для выполнения первой операции вытяжки всегда возникает вопрос о выборе схемы торможения заготовки. При этом большую помощь оказывают аналоги конструкций штампов, которыми располагают предприятия и проектные организации. Если аналитически или на основании аналогов устанавливают необходимость применения дополнительных средств торможения заготовки, то их предусматривают при конструкции нового штампа. Перетяжные ребра или пороги не только предотвращают складкообразование, но и стабилизируют процесс, сокращают расход листового металла. Последнее достигается благодаря тому, что перетяжные ребра и пороги во время формоизменения заготовки способствуют интенсивному растяжению штампуемого материала.

В традиционных конструкциях вытяжных штампов наибольшее распространение получили перетяжные ребра (рис. 117), которые при $s < 0{,}5$ мм рекомендуется встраивать преимущественно в рабочей части, расположенной в верхней половине штампа, а для более толстого металла ($s > 0{,}5$ мм), как правило, ребра располагают в нижней части штампа. Последнее более технологично для монтажа перетяжных ребер и обработки их при отладке штампа, но менее удобно для укладывания штампуемой заготовки и затрудняет очистку от грязи рабочей поверхности штампа.

Высоту h ребер назначают в зависимости от размеров штампуемой детали, толщины и рода материала. Когда требуется малая степень торможения, высота их может быть $h = 3 \div 4$ мм; при необходимости высокоэффективного торможения $h = 6 \div 8$ мм и более. Если штампуемая деталь

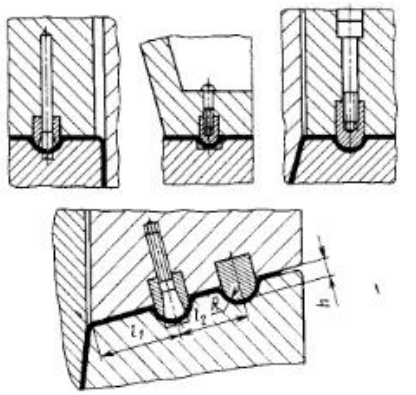


Рис. 117. Конструкция перетяжных ребер и схемы их применения

имеет фланец, то перетяжные ребра выносят за его пределы. Минимальное расстояние l_1 от края матрицы до перетяжного ребра и между ребрами l_2 должно быть в 2—2,5 раза больше ширины B ребра; для небольших штампов $B = 6 \div 10$ мм, для крупных $B = 13 \div 20$ мм. Способы крепления перетяжных ребер к складкодержателю показаны на рис. 117. Рабочую поверхность перетяжного ребра выполняют полукруглой.

На рис. 118 приведена конструкция штампа для вытяжки с применением перетяжных ребер, установленных в верхней части штампа (на прижиме). Штамп устанавливают на прессы двойного действия.

Решение вопроса о размещении перетяжного ребра в нижней или в верхней части штампа связано с формой и стойкостью рабочих частей штампа

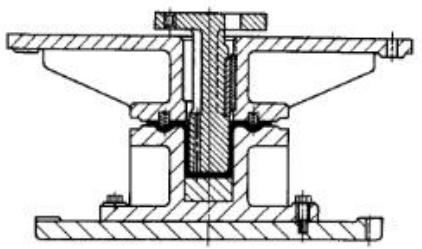


Рис. 118. Конструкция вытяжного штампа с применением перетяжных ребер

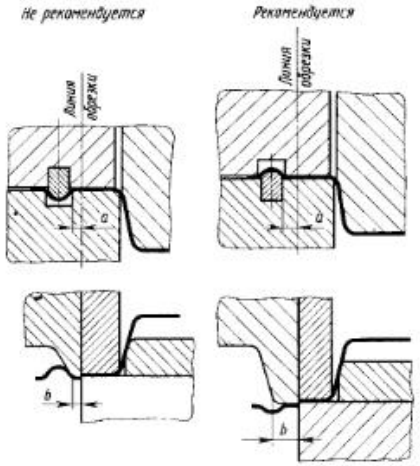


Рис. 119. Рекомендуемый вариант установки перетяжного ребра при малой величине размера *a* во фланце

для обрезки фланца. Например, при вытяжке деталей, имеющих фланец, на прессе двойного действия рекомендуется устанавливать перетяжные ребра не на прижиме, а в матрице (рис. 119). В результате представляется возможность изготавливать поясок матрицы с достаточной шириной *b*, гарантирующей надежную стойкость, не снижая требований к уменьшению размера *a* фланца в целях экономии металла.

Допускается к применению смешанная схема размещения ребер (при числе рядов не менее двух): одно в матрице, а второе (в соседнем ряду) на прижиме (см. рис. 128). В этом случае при втягивании материала в рабочий проем матрицы происходит его реверсивный перегиб между встречными ребрами, что интенсифицирует процесс растяжения. Это особенно необходимо при наклонном расположении фланца детали.

При вытяжке простых деталей ребра устаиавливают обычно в один ряд (пояс), а при формоизменении сложных деталей — в два—три ряда (пояса). Число рядов перетяжных ребер зависит также от формы участков детали в зонах перехода от фланца к образующей. Чем более плавный этот переход, тем больше необходимо рядов, и, наоборот, при резких переходах (с относительно малым радиусом закругления и с более крутым расположением боковой поверхности детали) рядность уменьшается или сводится к иулю. Перетяжные ребра (пороги) применяют не только для того, чтобы усиливать торможение металла для его растяжения, ио также и для обеспечения необходимых условий для более равномерного течения материала. Поэтому перетяжные ребра выполняют прежде всего в тех зонах, где материал относительно свободно втягивается в полость матрицы. Конструктивно перетяжное ребро выполняют таким образом, чтобы закрепляемая его часть могла прочно соединяться с рабочей деталью штампа (см. рис. 117), а выступающая имела гладкую поверхность для свободного скольжения штампуемого материала. От перегиба штампуемого материала, проходящего через перетяжное ребро, прижим и соответственно буфер пресса испытывают большую нагрузку. Значительное влияние на интенсивность торможения оказывает относительная величина площади контакта пуансона с заготовкой в первый момент вытяжки и, следовательно, форма дна штампуемой детали, а также ее габариты. Чем больше отдалены точки контакта пуансона с заготовкой от рабочих кромок матрицы в процессе вытяжки, значительнее выпуклость детали и больше ее габариты, тем в большей степени требуется применение перетяжных ребер (порогов). Различие форм и размеров штампуемых деталей затрудняет установление точной зависимости между указанными параметрами, поэтому потребность в применении перетяжных ребер (порогов) и число их рядов определяют опытным путем. Торможение заготовки можно осуществлять также путем перегиба края заготовки в вытяжном штампе. Например, это вполне целесообразно при деформировании плоской детали с неглубокими выступами, впадинами или с ребрами жесткости. Перегиб выполняют под углом $\alpha = 90°$ к горизонтальной плоскости (рис. 120).

Применение порогов как средства торможения более эффективно по сравнению с перетяжными ребрами. Конструктивно пороги являются составной частью рабочей кромки матрицы (рис. 121), поэтому в тех случаях, когда штампуемая деталь имеет фланец, их ширина зависит от ширины фланца в вытяжном переходе детали (с учетом припуска на обрезку). Если в окончательном виде деталь ие имеет фланца, то ширину B порога иазначают минимальной (10—15 мм для матриц из стали и 16—20 мм — из чугунного литья), исходя из необходимой прочности рабочих кромок матрицы вытяжного и обрезного штампов.

Высота h порога, по аналогии с перетяжным ребром, может колебаться в значительных пределах ($h = 3 \div 16$ мм) в зависимости от конкретных условий. Меньшие значения применяют в тех случаях, когда требуется относительно невысокая степень торможения. Кроме того, указанный параметр прямо пропорционален габаритам штампуемой детали. Радиус закругления рабочей кромки порога иазначают ориентировочно равным толщине s штампуемого материала, его значение уточняют при отладке штампа. От высоты h и радиуса закруглеиия r порога зависит степень защемления материала. Напуск материала за пределами порога при малой глубине детали ограничивают до минимума, оставляя к концу процесса только запас на перегиб края заготовки. В таких условиях при малой глубине детали металл в процессе деформирования перемещается из зоны порога в малых объемах или остается неподвижным (на этом участке).

Для относительно глубоких деталей с вертикальными (или близкими к вертикальным) стенками пороги применяют при наличии предварительно изогнутых заготовок. Последнее создает условия для ведения процесса формоизменения глубокой детали без существенного перемещения материала изпод порогов в полость матрицы, т. е. за счет использования эффекта растяжения. Перетяжные пороги обеспечивают значительно большую экономию листового проката по сравнению с применением перетяжных ребер не только потому, что они конструктивно обеспечивают более резкий перегиб и более интенсивное растяжение металла, но

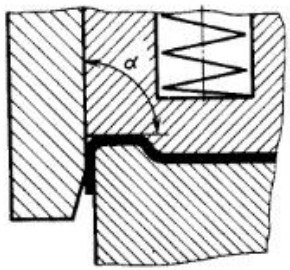


Рис. 120. Перегиб края заготовки на угол $\alpha = 90°$ в целях торможения листового материала при вытяжке (формовке)

также за счет непосредственного вписывания их в рабочую кромку матрицы. Это дает возможность применять листовые заготовки с меньшими габаритами. Учитывая явное преимущество порогов перед перетяжными ребрами, в ближайшем будущем будет осуществлен перевод многих конструкций штампов с перетяжными ребрами на конструкции с порогами.

Для получения завершенной формы детали необходимо, чтобы вытяжка протекала эффективно с начала до конца процесса. Если деталь вытягивается не напровал, то при завершении процесса оставляют край заготовки хотя бы с малой площадью под прижимом (или под порогом). Благодаря этому материал находится под напряжением до конца процесса. Последнее условие может быть соблюдено и при

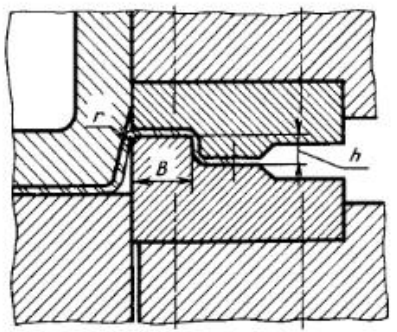


Рис. 121. Основные элементы перетяжного порога

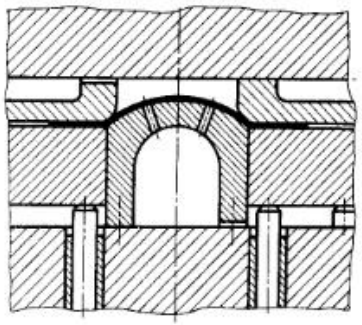


Рис. 122. Пример конструкции вытяжного штампа для выпуклой детали, когда допускается выполнять матрицу с вертикальными стенками

выходе фланца из-под прижима. Но для этого требуется, чтобы заготовка подвергалась эффективному растяжению за счет применения других средств торможения штампуемого материала. При вытяжке напровал (см. рис. 124,*б*; 125) штампуемый материал с начала до конца находится в напряженном состоянии, так как непрерывно протягивается через зазор *z* между матрицей и пуансоном.

В тех случаях, когда поверхность штампуемой детали имеет сложную форму (с резкими переходами, выступами, углублениями), рабочую полость матрицы вытяжного штампа и соответственно пуансон пригоняют друг к другу с учетом толщины штампуемого материала и соответствующих рельефов. Работа такого штампа завершается правкой формы детали (см. рис. 131; 137). Если штампуемая деталь с фланцем имеет пологую симметричную фор-

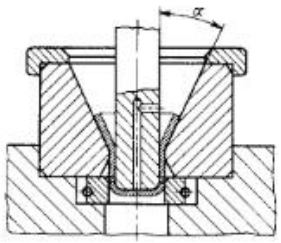


Рис. 123. Конструкции матриц с глубокой заходной частью

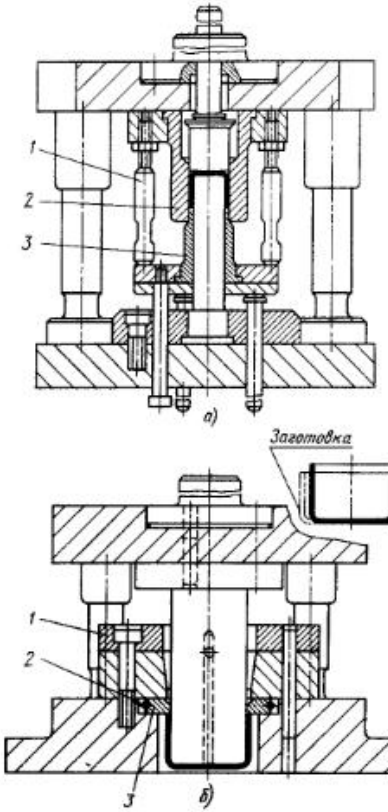


Рис. 124. Штампы для последующей вытяжки деталей типа коробок и стаканов на прессе простого действия

му при наличии тупого угла между фланцем и образующей (или касательной к образующей), то матрицу упрощают, выполняя ее с вертикальными стенками (рис. 122). В этом случае эксплуатация штампа возможна только при наличии ограничителей закрытой высоты (любой конструкции).

Штампуемые детали с вертикальными стенками можно вытягивать как с правкой дна, так и без правки.

Вытяжка деталей (преимущественно цилиндрических) из листовых заготовок с устранением складок в процессе формообразования возможна и без прижима (складкодержателя), если рабочая полость матрицы имеет заходную часть, выполненную в виде конуса

или по кривой, близкой к трактрисе (рис. 123). Применение таких матриц не только обеспечивает протекание процесса формирования детали с устранением складок, но и способствует достижению более высокой степени деформации (см. гл. 4).

Последующие операции вытяжки при многооперационной штамповке в отличие от первого перехода выполняют с меньшей степенью деформации, поэтому складкодержатель требуется не всегда. На рис. 124, *а* приведена конструкция штампа для последующей операции вытяжки, который устанавливают на пресс одинарного действия. Стакан-фиксатор *3* может одновременно выполнять роль складкодержателя, нагруженного буфером пресса (штампа). После вытяжки фиксатор *3* осуществляет функции съемника отштампованной детали с пуансона. Для того чтобы буфер не создавал излишнего давления на штампуемую деталь, устанавливают регулируемые шпильки-компенсаторы *1*, которые, действуя на буфер, освобождают штампуемую заготовку от защемления ее матрицей *2*.

Без складкодержателя (при малой степени деформации) последующую вытяжку (перетяжку) заготовок с равным сечением по всей высоте выполняют, как правило, напровал (рис. 124, *б*). Полуфабрикаты загружают в фиксатор *1*. Готовую деталь (заготовку) после вытяжки снимают с пуансона полукольцами *3*, которые удерживаются в рабочем положении пружиной *2*. Если при выполнении процесса последующей вытяжки подобных деталей в положении дном вниз складкодержатель необходим, то штамповка напровал возможна только на прессе двойного действия (рис. 125).

По аналогии с конструкцией, приведенной на рис. 124, *б*, заготовку загружают в фиксатор *3*. Стакан-прижим *2* прикрепляют к плите *1*, соединенной с наружным ползуном пресса. Заготовка протягивается через матрицу-фильеру *4* с участием прижима *2*. Способ съема детали с пуансона такой же, как и в конструкции, показанной на рис. 124, *б*. Зазор *z* между прижимом и матрицей устанавливают (1,2÷1,3) *s*.

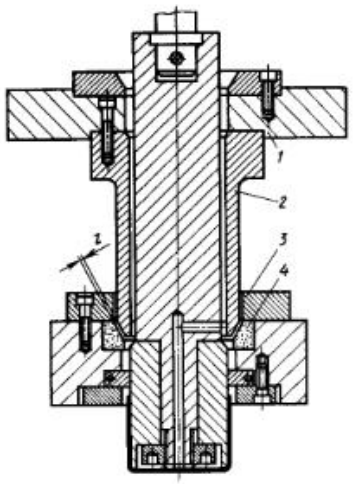


Рис. 125. Штамп для последующей вытяжки деталей типа коробок и стаканов на прессе двойного действия

В осуществлении операции последующей вытяжки особое место занимает выворотная (реверсивная) вытяжка. Простота штамповой оснастки и высокая эффективность являются преимуществами этого способа. На рис. 126 приведены схемы штампов для выворотной вытяжки деталей параболической и цилиндрической формы. В первой схеме (рис. 126, *а*) предварительно полученную цилиндрическую заготовку укладывают по диаметру *D* на матрицу *1* в положении дном вверх. Заготовка протягивается (выворачива-

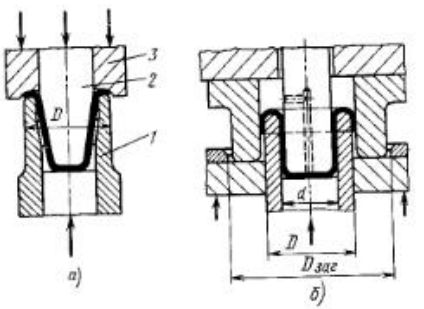


Рис. 126. Схемы конструкций штампов для выворотной (реверсивной) вытяжки

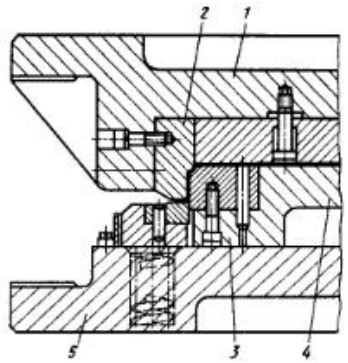


Рис. 127. Штампы для правки (калибровки) ступенчатой детали

ется) пуансоном *2* до получения заданной формы детали.

Геометрическая форма внутренней полости матрицы может значительно отклоняться от формы детали, так как процесс формообразования осуществляется за счет конфигурации пуансона. Матрица служит для опоры и фиксации заготовки. Заготовка в процессе выворачивания постоянно контактирует с прижимом.

Вторая конструкция (рис. 126, *б*) предусматривает одновременную вытяжку цилиндрического стакана (полуфабриката) диаметром D из плоской заготовки диаметром $D_{заг}$ и выполнение выворотной вытяжки диаметром d. Матрица после вытяжки цилиндрического стакана припятствует возможной потере устойчивости полуфабриката в процессе выворачивания. При высоких требованиях к размерам штампуемой детали, получаемой вытяжкой, применяют **штампы для калибровки.** Принципиальная схема конструкции штампа для калибровки детали ие отличается от штампа для ее вытяжки. Все осиовные элементы калибровочного штампа идеитичны элемеитам вытяжного штампа, но их взаимная пригонка обеспечивает правку штампуемой детали в соответствии с заданными размерами. В зависимости от требований чертежа детали правке—калибровке можно подвергать только отдельные элементы (например, только фланец и прилегающий к нему радиус закругления). Если деталь имеет несколько ступеней, править их рекомендуется все одновременно (рис. 127). Предпочтительно, чтобы штампуемая деталь располагалась дном вверх. Характерным признаком калибровочного штампа является его жесткость: по вертикали и по горизонтали. С этой целью в приведеиной конструкции верхняя плита *1* и пуансон *4* имеют увеличенную толщиiу, в результате чего есть возможиость применения глубокой врезки секций матрицы *2* и секций пуансона *3*.

Усилие съема цилиидрической детали с пуансона после калибровки определяют по формуле

$$T = 1{,}15\sigma_т F\mu_{max} \ln r_н/r_{вн}, \quad (27)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести штампуемого материала; F — площадь контакта штампуемой детали с пуансоном в начальный момент съема; μ_{max} — максимальный коэффициент трения между штампуемым материалом и пуансоном; $r_{вн}$ — радиус внутренней полости детали; $r_н$ — радиус наружной поверхиости детали.

Среди большого разнообразия конструкций вытяжных штампов особое место принадлежит **штампам для формообразования облицовочных деталей:** кузова, кабин всевозможных машин. Детали данной категории обычно относятся к сложным крупногабаритным тонколистовым оболочкам, получаемым с помощью холодной листовой штамповки. Форму и размеры облицовочных деталей определяют преимущественно не расчетным путем, а замерами с мастер-модели, которую изготавливают на начальном этапе разработки конструкции той или иной машины. При этом учитываются вопросы технической эстетики, необходимой вместимости и грузоподъемиости, рентабельности и технологичности изготовления. Одиовременно стремятся к упрощению форм облицовочных панелей проектируемого объекта. Однако не всегда это удается. Значительиая часть панелей остается сложной, что создает особые трудности при решении технологических и конструкторских задач в процессе подготовки прозводства.

Вновь созданный дизайнерами облицуемый объект предварительно прорабатывают на технологичность его изготовления в целом и проводят предварительную разбивку его на составные части (в будущем — детали), пригодные для изготовления холодной листовой штамповкой.

Главная трудность при изготовлеии облицовочных деталей кузова — получение формы поверхности из плоской заготовки с применением метода пластической деформации. Для оценки вопросов штампуемости условимся классифицировать облицовочные детали по двум основным призиакам: по служебиому назиачению и по конструктивному исполнению (форма поверхности, положение в пространстве и пр.). По первому признаку облицовочные детали подразделяют на наружные, внутренние и каркасные (несущая часть облицовочного комплекса). Наиболее высокие требования предъявляют к наружным облицовочным деталям. По сравнению с деталями для внутренней облицовки они должны обладать более высокой точностью формы и размеров, достаточной жесткостью, а также иметь гладкую поверхиость с высокими параметрами шероховатости. Аналогичные требования предъявляются и к некоторым каркасным деталям.

Конструктивно облицовочные детали классифицируют на неглубокие, средней глубины и глубокие. В каждом классе могут быть простые, средней сложности и сложные детали. Кроме того, они могут иметь относительно постоянную глубину формы и переменную, а также плоский или криволиней-ый фланец. Каждый отличительный призиак оказывает непосредствеиное влияние на конструктивное исполнеине штамповой осиастки для их изготовления.

В целях обеспечения полного соответствия формы и размеров облицовочной детали основному ее эталону — «мастер-модели» изготавливают негативную гипсовую (или из другого материала типа политерон) модель, которая служит копиром для обработки рабочей полости матрицы вытяжного штампа непосредственно на копировально-фрезерном станке и эталоном для программирования при использовании ЭВМ. Кроме того, по моделям воспроизводятся шаблоны, необходимые конструкторам и изготовителям штампов. Роль копира при изготовлении пуансона штампа выполняет позитивиая модель, изготовленная из пенополистирола или другого легко обрабатываемого материала. Специальный экземпляр позитивной модели служит контрольным эталоном для ОТК; по ней осуществляется проверка правильности формы штампуемой детали.

Большую роль играют модели и при электроэрозийном способе обработки рабочих частей штампа. Негативные и позитивиые мастер-модели определяют форму поверхности будующей облицовочной детали. Началу разработки конструкции первого вытяжиого (формоизменяющего) штампа для облицовочной детали предшествует большая технологическая подготовка, включающая построеиие так называемого вытяжиого перехода. Последний является промежуточной формой штампуемой детали, наиболее техиологичной для вытяжки.

Прн разработке вытяжного перехода выявляется оптимальное положение облицовочной детали в пространстве, которое она должна занимать при вытяжке, определяется форма поверхностн флаица (и, следовательно, «зеркала» прижима штампа), месторасположение и число перетяжных ребер (порогов), иазначаются необходимые припуски, напуски и др. Большую помощь при этом оказывают мастер-модель и ее производиые. В разработке чертежа вытяжного перехода обычио участвуют высококвалифицированные технологи, ведущие конструкторы по штампам, модельщики, литейщики и инженерио-технический персонал инструментально-штампового производства.

Разработка чертежа вытяжиого перехода является завершающей стадией технологической проработки перед началом проектирования комплекта штампов для изготовления облицовочной детали. В настоящее время в кузовостроении возрастает роль ЭВМ и особенно прн производстве моделей сложных штампов. Созданные на основе

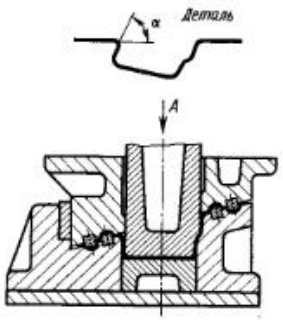


Рис. 128. Штамп для вытяжки крупногабаритной детали, повернутой на угол α по отношению к ее служебному положению

ЭВМ измерительные машины с вычислительным устройством для измерения и контроля поверхности сложных пространственных форм в состоянии выполнять с высокой точностью размерные и чертежные работы. Одновременно с помощью современных телевизионных установок представляется возможность считывать чертежи с формообразующими линиями в трехмерном измерении. Применение ЭВМ и САПР представляет возможность создавать штамповую оснастку, минуя изготовление ряда промежуточных моделей.

Простейшим вариантом размещения облицовочной детали в штампе в процессе вытяжки является ее исходное (служебное) положение. Но на практике часто возникает потребность поворота детали в вытяжном штампе на некоторый угол в одной или двух плоскостях.

Во-первых, это необходимо осуществлять в том случае, когда отдельные участки боковой поверхности штампуемой детали в исходном ее положении образуют с горизонтальной плоскостью угол $\alpha < 90^\circ$. Поворот всей детали на угол $\beta \geqslant 90^\circ - \alpha$ (рис. 128) создает условия для построения вытяжного перехода с вертикальным расположением указанного выше участка боковой поверхности детали. В результате этот прием обеспечивает свободное вхождение пуансона в матрицу штампа в направлении, указанном стрелкой A, и вся боковая поверхность детали (включая ее участки с углом $\alpha < 90^\circ$) будет формироваться в соответствии с чертежом детали.

Иногда поворот детали оправдан тем, что при его осуществлении удается получить вытяжной переход с меньшей глубиной вытяжки по сравнению с ее основным рабочим положением и обеспечить более равномерные условия для вытягивания материала из-под прижима в полость матрицы. Последнее достигается прежде всего за счет возможно большего охвата материала пуансоном в первый момент вытяжки.

Расширение площади контакта пуансона со штампуемым материалом способствует уменьшению растягивающих напряжений в трудноштампуемых зонах детали и к выравниванию их значений по всей поверхности заготовки. Результат — уменьшение процента брака по разрыву металла. При повороте детали необходимо добиваться того, чтобы в процессе вытяжки на отдельных участках не образовывались излишки металла или, напротив, его недостача. Такое явление прежде всего может наблюдаться при вытяжке деталей с ярко выраженным несимметричным строением формы поверхности.

Отклонение положения штампуемой детали при вытяжке относительно ее рабочего положения в оснащаемом объекте может быть и по причине нетехнологичности обработки ее в последующих штампах (после вытяжного), включая несоблюдение описанного выше условия о допускаемых углах резания рабочих частей в разделительных штампах. При тщательной технологической проработке иногда неизбежны изменения формы детали (с проведением соответствующих изменений в мастер-модели) или перенесение «линий разъема» (линий стыковки деталей), планируемых на мастер-модели.

Пример, рассмотренный на рис. 128, иллюстрирует возможный вариант корректировки размещения штампуемых деталей в вытяжных штампах с отклонением от их исходного рабочего положения в оснащаемом объекте сравнительно на небольшой угол. Но есть и такая группа облицовочных деталей, вытяжку которых технически целесообразно производить при повороте их на угол 90° или на 180°, что обусловлено их конструкцией и формой поверхности. Расположение детали в вытяжном штампе, повернутой на угол 180° по отношению к ее исходному положению, также может определяться схемой работы прессового оборудования: на прессах двойного действия процесс вытяжки обечайки осуществляется «дном» вниз, а на прессах одинарного действия — «дном» вверх.

Отсутствие мастер-модели усложняет проектные работы по разработке чертежа вытяжного перехода и конструкций штампов, особенно когда технологически рационально осуществлять поворот детали в одной или в двух плоскостях. В этом случае, как нежелательный вариант, вытяжной переход строят по чертежу детали с применением доступных средств проекционного черчения. Однако это требует большой затраты времени и может быть выполнено только высококвалифицированным специалистом. Поэтому при отсутствии мастер-модели ее заменяют натуральным образцом (эталоном) штампуемой детали, изготовленным ручным способом с применением простейших болванов и приспособлений.

Устанавливая эталон детали на плоскости в целесообразном для штамповки положении, на чертеж переносят преобразованные линии контура (путем проектирования и замеров), координируют базовые точки в двух или трех координатах, постепенно создавая графическое изображение детали в новом ее расположении в пространстве.

Таким образом, проектирование штамповой оснастки может успешно выполняться параллельно (или раздельно) с изготовлением головной мастер-модели. Заметим, что натуральный образец облицовочной детали играет исключительно важную роль не только в процессе разработки технологии и штамповой оснастки, но также и при изготовлении штампов.

В отличие от глубоких малогабаритных деталей, для получения окончательной формы которых требуется применение нескольких штампов, основная форма крупногабаритных полых деталей в большинстве случаев создается в одном вытяжном (формоизменяющем) штампе. К этому всегда следует стремиться.

В первом вытяжном штампе должна деформироваться в основном вся поверхность заготовки. Поэтому необходимо, чтобы конструкция штампуемой детали была технологичной для выполнения операции вытяжки. Одним из главных условий этого является обеспечение штампуемости участков (углов) с относительно небольшим радиусом закругления в плане. Эту условную штампуемость легко определить, если угловые участки рассматривать как части цилиндра. За основу в этом случае принимают угол детали с наименьшим раднусом закругления в плане. И только для калибровки базовых участков детали с подчеканкой малых раднусов закругления и выполнения мелких выпуклостей вводят второй формоизменяющий штамп, в котором основная форма детали, созданная в процессе вытяжки в первом формоизменяющем штампе, не нарушается. Как исключение, ряд глубоких сложных кузовных деталей, состоящих из двух (или нескольких) ступеней, формируются за два вытяжных перехода. В первом вытяжном штампе получают основную (доминирующую по площади поверхность) форму детали, а во втором — вытягивают вторую ступень без нарушения ранее образованной формы.

Особое внимание следует уделять штампам, в которых вытягивается деталь при наличии ярко выраженной неравномерной деформации металла. Это наиболее вероятно для деталей с переменной высотой и криволинейным контуром в плане. Участки с резким изменением глубины детали (см. рис. 137), как правило, являются причиной образования складок и волн на поверхности обечайки, поэтому без эффективного растяжения металла качество штампуемых деталей бывает низким. В этом случае иногда вынужденно вводится технологический напуск. Этот металл является избыточным при формировании поверхности детали, однако он создает благоприятные условия для сохранения его натяжения по всему периметру до конца процесса вытяжки.

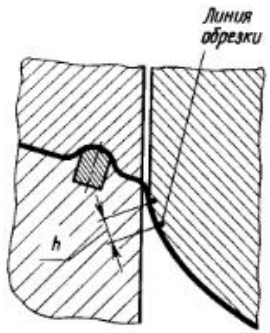


Рис. 129. Пример применения в вытяжном переходе при изготовлении крупногабаритной детали напуска высотой h с целью дополнительного заглубления ее в полость матрицы

Для детали без фланца с боковой поверхностью, не имеющей вертикальных участков, целесообразно в вытяжном переходе предусматривать некоторое превышение высоты h (на 3—8 мм) от линии обрезки края детали (рис. 129). Этот напуск обеспечивает дополнительное протягивание штампуемого участка и служит гарантией для получения высокого качества поверхности края детали без наличия складок и волн. Кроме того, указанный напуск образует поясок по периметру детали, необходимый для размещения режущей рабочей части обрезного штампа. Введение напуска приводит к некоторому дополнительному расходу металла, однако эта мера, как правило, необходима.



Рис. 130. Схема компоновки прижима и пуансона в вытяжном штампе, когда их рабочие поверхности выполнены под углами α и β, противоположно направленными друг к другу

Излишнего расхода тонколистового металла при штамповке несимметричных деталей в некоторых случаях удается избежать путем объединения (спаривания) двух и реже большего числа деталей в одни вытяжной переход. Данный технологический прием, кроме экономии металла, создает условия для формирования симметричной оболочки, при котором улучшается процесс формоизменения заготовки.

Поверхность прижима сложных вытяжных штампов может иметь различную геометрическую форму в зависимости от конфигурации штампуемой детали и формы ее фланца. Нередки случаи, когда в результате построения рабочей поверхности прижима и торцовой поверхности пуансона образуются углы β и α (рис. 130), которые могут значительно отличаться друг от друга. Так как угол β прижима равен или близок по величине соответствующему углу зеркала матрицы, процесс втягивания материала заготовки в рабочую полость протекает неравномерно и, следовательно, условия формирования детали усложняются. Несмотря на это, в практике известны случаи, когда возникает необходимость вести процесс вытяжки при указанном сочетании форм рабочих поверхностей прижима и пуансона. Однако для того, чтобы формирование оболочки осуществлялось без разрыва металла, необходимо соблюдать два условия: $\alpha < \beta$; $\alpha < 180° > \beta$.

Криволинейность рабочей поверхности прижима (а следовательно, и фланца детали) создает трудности не только для процесса формирования детали, но и для изготовления штампа.

Сравнительно простым является вариант, когда прижим криволинеен только в одной плоскости (в одном направлении), что не вызывает больших трудностей в пригонке спариваемых поверхностей и не мешает нормальному протеканию процесса втягивания штампуемого материала в проем матрицы.

Изгиб заготовки в двух плоскостях осложняет картину. В этом случае резко ухудшаются условия для течения материала, возможно появление гофров и других дефектов в зоне прижима

не только в процессе заглубления пуансона в матрицу, но и ранее, в момент сближения складкодержателя с матрицей. Но в последнее время прибегают к этому усложнению все чаще (см. гл. 22). Поверхность прижима должна быть эквидистантной по отношению к рабочей поверхности («зеркалу») матрицы и пригоняется с учетом обеспечения равномерного зазора между ними $z = (1 \div 1{,}1)\,s$.

Большие габариты и относительно малая жесткость облицовочных деталей по сравнению с мелкими листовыми деталями требуют применения технологических процессов, способствующих их упрочнению и экономии металла. Поэтому для данной категории оболочек особенно важно применять эффективные средства торможения штампуемого материала во время вытяжки. Исходя из этого, большинство вытяжных штампов для облицовочных деталей оснащают перетяжными ребрами или порогами.

Перетяжные ребра, как указывалось выше, устанавливают в один ряд и в несколько рядов. Ориентировочная планировка зон расположения ребер и их рядность закладываются при конструировании, а во время отладки штампа их уточняют до получения штампуемого перехода с высоким качеством.

Опыт показал, что эффект торможения требуется повышать (за счет увеличения числа рядов ребер) не только со стороны пологой формы детали, но и там, где дно детали должно иметь большое закругление (рис. 131). Наличие боковой поверхности штампуемой детали с вертикальными стенками (частично или полностью) требует снижения интенсивности торможения.

Из рисунка видно, что даже при наклонной поверхности фланца (когда процесс вытягивания материала в матрицу облегчен) и большом радиусе R в зоне вертикальной стенки детали перетяжные ребра установлены только в один ряд, а с противоположной стороны, также с относительно большим радиусом, но без вертикальной стенки, — в два ряда.

Интенсивное торможение штампуемого материала в процессе формо-

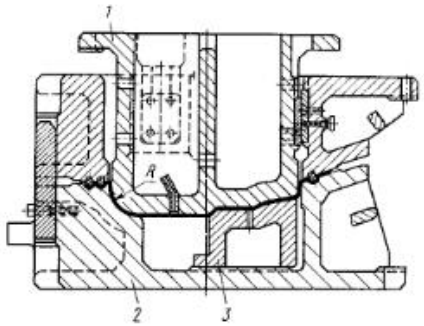


Рис. 131. Штампы для вытяжки детали, поверхность которой имеет вертикальные стенки и плавно скругленные участки

изменения заготовки обеспечивает плотное прилегание ее по пуансону, благодаря чему представляется возможность выполнять пригонку рабочих частей не по всей поверхности. Например, на рис. 131 смыкание пуансона *1* с матрицей *2* и вставкой *3* осуществляется только в зоне резких переходов, а также при формировании участка детали с большим радиусом R.

Необходимое число перетяжных ребер зависит также от формы контура штампуемой детали в плане. В частности, участки с малой кривизной требуют более интенсивного торможения.

При вытяжке крупногабаритных кузовных деталей с плавной (обтекаемой) поверхностью всегда требуется усиленное торможение материала, которое обеспечивают путем варьирования числа рядов перетяжных ребер. На рис. 132 приведена конструкция вытяжного штампа, оснащенного перетяжными ребрами в два ряда. Наклонное расположение фланца штампуемой детали приводит к смещению верхней части штампа по отношению к нижней, поэтому внутри штампа встраивают противоотжим. В рассмотренной конструкции функции противоотжима выполняются за счет местного прилива в прижиме, который контактирует с матрицей через стальные пленки *6* и *7*, а на рис. 128 прилив-противоотжим выполнен в матрице.

Характерным признаком всех штампов для вытяжки крупногабаритных

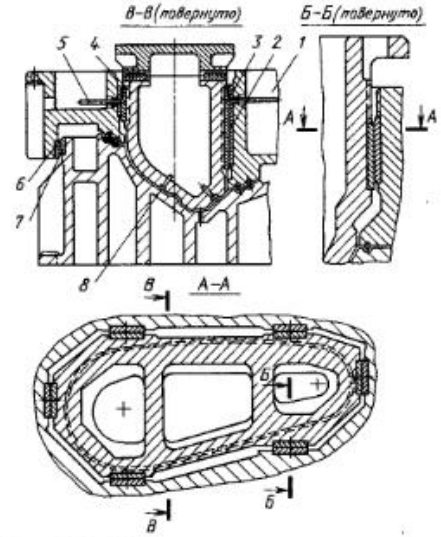


Рис. 132. Штамп для вытяжки крупногабаритной облицовочной детали с применением в прижиме перетяжных ребер в два ряда

глубоких деталей является наличие надежного взаимного направления между пуансоном и прижимом-складкодержателем. Например, в рассматриваемой конструкции встроены относительно длинные призматические направляющие с шестью парами закаленных планок *2*, *3* и т. д., закрепленными соответственно к пуансону *4* и прижиму *1*.

Обязательным условием нормальной работы пары пуансон — прижим является наличие смазочного материала

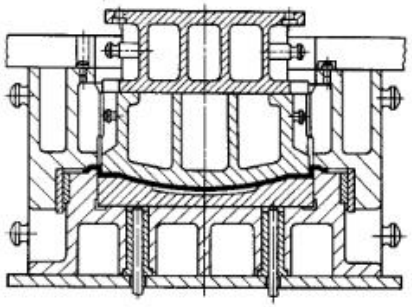


Рис. 133. Вытяжной штамп с порогами

между их направляющими, который подается через трубки *5*. Доступ к направляющим пленкам *2*, *3* и т. д. осуществляется через ниши в отливке (см. сечение *Б—Б*). Сообщение с атмосферой пуансона и полостью матрицы осуществляется с помощью трубок *8* (в пуансоне) и отверстий (см. сечение *В—В*).

Из опыта эксплуатации крупногабаритных вытяжных штампов известно, что в особых случаях число рядов перетяжных ребер может достигать четырех и более (преимущественно при штамповке крупногабаритных деталей с наклонным фланцем). Это требует наличия большого припуска и, следовательно, лишнего расхода металла. Лучшим выходом в подобных ситуациях является применение активного торможения листового материала во время формоизменения заготовки.

Как указывалось выше, наиболее эффективным средством торможения заготовки в штампах для вытяжки являются перетяжные пороги (см. рис. 121), и в кузовной штамповке они вытесняют перетяжные ребра, играя большую роль в развитии малоотходной технологии и в снижении материалоемкости.

Штампы с порогами (рис. 133) наиболее просто решают конструкторскую задачу обеспечения надежного защемления материала. Применение порогов особенно целесообразно в штампах для вытяжки относительно неглубоких облицовочных деталей с боковой поверхностью, имеющей плавную форму (при наличии малой кривизны).

Однако в некоторых случаях пороги приемлемы и для вытяжки относительно глубоких деталей. Прямоугольная форма является доминирующей для порогов. Их вершину (см. рис. 121) выполняют с закруглением $r \approx (1 \div 2)\,s$. Чем меньше радиус закругления r и чем больше высота h порога, тем сильнее защемление штампуемого материала. Увеличивая радиус закругления r и уменьшая высоту h, можно расслабить защемление материала, способствуя возможности перемещения его в полость матрицы (такая необходимость возникает, например, при относительно большой глубине штампуемой детали).

По аналогии с перетяжными ребрами применяемость порогов ограничивается толщиной штампуемого материала ($s_{max} \approx 1{,}5$ мм).

Перетяжные пороги в вытяжных штампах устанавливают в большинстве случаев только в один ряд, и так же, как при использовании перетяжных ребер, в зависимости от конфигурации штампуемой детали их можно располагать в виде сплошного пояса или прерывно на отдельных участках «зеркала» матрицы.

Фиксацию деталей в последующих (после вытяжки) штампах предпочтительно осуществлять по контуру детали, полученной в первом (вытяжном) штампе. Однако при штамповке неглубоких деталей пологой формы фиксация их по контуру не обеспечивает необходимой точности позиционирования или вообще невыполнима. В таких случаях в вытяжной переход вводят технологические отверстия (не менее двух). Учитывая трудности удаления отходов после пробивки отверстий в вытяжном штампе, применяют метод проколки.

Если вытяжной штамп устанавливают на пресс двойного действия, то прокол отверстий осуществляется с помощью специального механизма — дыропрорывателя (рис. 134), который срабатывает в конце подъема ползуна пресса. Палец *1*, встроенный в пуансон, поворачивает вокруг оси *2* кулачок *3*, который нажимает на пуансон-прорыватель *4*, образующий отверстие во фланце детали. При дальнейшем подъеме ползуна вся система, встроенная в складкодержатель-прижим *7*, возвращается в исходное положение пружинами *5* и *6*. Такая схема работы механизма позволяет свести до минимума утяжку (искажение) проколотых отверстий во фланце детали.

Матрицы для относительно неглубоких облицовочных деталей выполняют преимущественно цельнолитыми (рис. 135), а для глубоких — в виде рамы с вставками. Однако если боковая поверхность глубокой детали имеет наклонную форму (см. рис. 132), то матрицу выполняют цельнолитой без дополнительной облицовки.

Крупногабаритные рабочие части (матрица, пуансон, прижим) вытяжных

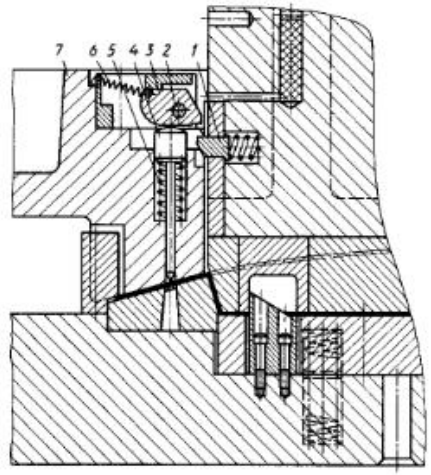


Рис. 134. Дыропрорыватель, встроенный в штамп для вытяжки на прессе двойного действия

штампов для изготовления облицовочных деталей в большинстве случаев получают литьем из чугуна марок не менее СЧ 25 или из чугуна специальной модификации. Однако если штампуемая деталь имеет рельефную поверхность с резкими переходами, то соответствующие участки рабочих частей изготавливают из стальных термообработанных вставок (секций). При применении перетяжных порогов матрицу и прижимное кольцо армируют стальными вставками независимо от формы поверхности облицовочной детали (см. рис. 137).

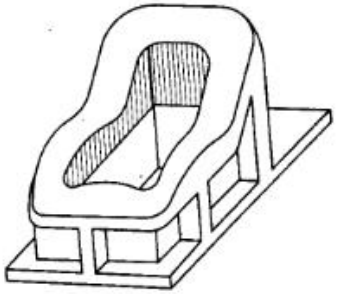


Рис. 135. Пример конструкции цельнолитой матрицы штампа для вытяжки крупногабаритной детали

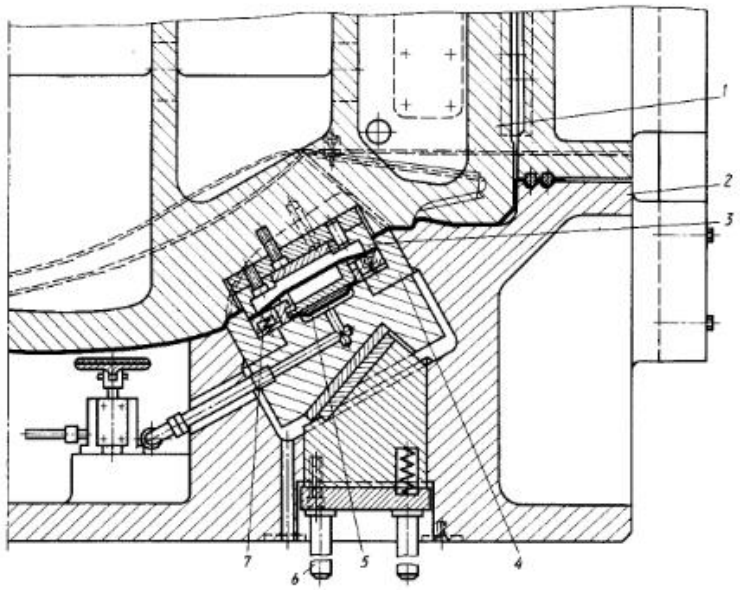


Рис. 136. Разрез конструкции штампа для выполнения вытяжки основной формы облицовочной детали и дополнительной вытяжки с применением пресса тройного действия

Местные выступы на поверхности штампуемой детали, которые формируются в проеме матрицы без участия складкодержателя вытяжного штампа, могут быть без заметных дефектов только при их глубине $h \leqslant 5s$, так как процесс формообразования в этом случае происходит за счет местного растяжения металла.

Наибольшие габаритные размеры верхней части штампа в плане, как правило, не превышают размеров нижней части штампа. Это придает конструкции компактность, достаточную устойчивость и удобство для транспортирования с помощью подъемно-транспортных средств. Реже встречаются конструкции вытяжных крупногабаритных штампов, у которых верхняя часть больше нижней, что обусловлено значительной разницей габаритов окна ползуна (или адаптера) пресса двойного действия со штампуемой деталью. Для обеспечения устойчивости такого штампа в целом его нижнюю часть оснащают дополнительной относительно тонкой плитой из проката (см. рис. 118 и 133).

Вытяжные штампы для изготовления крупногабаритных деталей отличаются от других штампов не только своими большими габаритами и значительной массой (достигая иногда нескольких десятков тонн), но также и сложностью конструкции, связанной со спецификой формирования различных оболочек. На рис. 136 показан разрез крупногабаритного штампа. Штамп устанавливают на пресс тройного действия, процесс дополнительной вытяжки в дне детали осуществляется с помощью нижнего ползуна, (через толкатели *6*).

Для облегчения процесса вытяжки в дне детали вырубается технологическое отверстие (которое допускается в этой зоне детали) или надрезается материал без отделения отхода. Эта операция производится секционной матрицей *4*, встроенной в основную формоизменяющую матрицу *2*, и секционным пуансоном *3*, встроенным в основной формообразующий пуансон *1*. Удаление отхода после вырубки технологического отверстия осуществляется

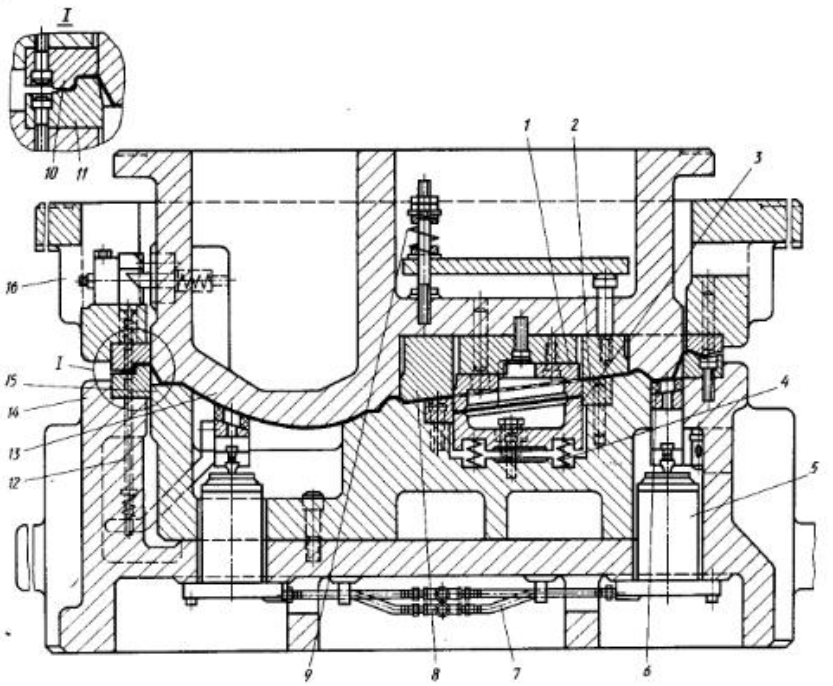


Рис. 137. Конструкция крупногабаритного штампа для вытяжки с механизацией подъема штампуемой детали

пневмоцилиндром *5* диафрагменного типа и пружинами *7*.

Вырубка отверстия или местная надрезка на поверхности крупногабаритной детали — распространенный технологический прием. Он расширяет возможности для формирования на поверхности детали различных выступов, впадин без разрыва металла, а также создает благоприятные условия при деформировании тех зон детали, которые не удается получить вытяжкой обычным способом.

На рис. 137 приведен второй пример выполнения вырубки технологического отверстия (окна) на поверхности детали в процессе вытяжки кузовной детали. Оборудованием является пресс двойного действия. Вырубка окна осуществляется с помощью матрицы *2* и пуансона *1* в тот момент, когда процесс вытяжки основной формы детали находится в начальной стадии. Отход после вырубки удаляется (выпрессовывается) из матрицы выталкивателем *3* с помощью пружины *4*. Отформованная деталь выносится из штампа механической рукой (на рисунке не показана). Подъем детали в штампе, необходимый для захвата рукой, производят пневмоцилиндры *5*. Эластичные прокладки *6* предотвращают образование «следов» на поверхности детали. Пневморазводка *7* скрыта внутри штампа.

Съем детали с пуансона *1* осуществляется съемником *8* от пружин *9*. Пороги *10* и *11* выполнены по контуру матрицы с переменным сечением, что объясняется неравномерностью формы по периметру детали.

Внешняя форма детали не обеспечивает ее надежной фиксации в последующих штампах (по технологическому процессу), поэтому здесь применяют метод проколки технологических отверстий на поверхности фланца механизмом *12*.

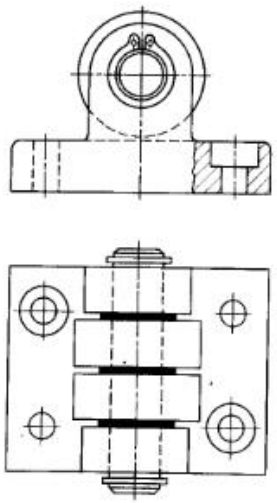


Рис. 138. Конструкция предохранительного полиуретанового (резинового) ролика

Основной формообразующий пуансон *13* и прижим *16* цельнолитые (из чугуна), а формообразующая матрица составлена из двух составных частей — отливок *14* и *15*.

Одним из важных требований к конструкциям штампов для формирования крупных панелей, предназначенных для облицовки различных объектов машиностроения, является обеспечение глянцевой поверхности листового металла с сохранением состояния его поставки. Все отштампованные детали подвергают тонкой декоративной окраске, поэтому их поверхности не должны иметь царапин и забоин. Для этого штампы для вытяжки оснащают резиновыми или полиуретановыми роликами (рис. 138), которые устанавливаются на входе (рис. 139) или на выходе обрабатываемой заготовки (с фронта или с тыла), а иногда и с обеих сторон.

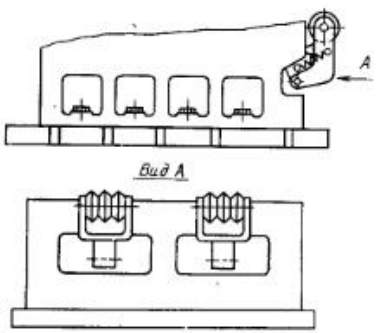


Рис. 139. Пример применения в вытяжном штампе роликов из полиуретана (резины)

Определение конфигурации и размеров заготовок для штампуемых облицовочных деталей является также сложной задачей. Аналитические расчеты размеров заготовок основаны на положении, что длина развертки сечений вытяжного перехода больше длины разверток соответствующих сечений заготовок на 5—15 % и обычно является ориентировочной. Окончательную форму заготовки уточняют при отладке вытяжного и других штампов, входящих в комплект оснастки для изготовления этой детали. Технология и последовательность изготовления комплекта штампов строятся таким образом, чтобы осуществлялась полная согласованность между ними. Основной формоизменяющий (обычно вытяжной) штамп изготавливают первым. Уточненная конфигурация заготовки в этом штампе служит шаблоном при изготовлении рабочих частей вырубного штампа. Небольшая партия облицовочных деталей, полученных в первом штампе, направляется для проведения анализа их собираемости в оснащаемом объекте. Как указывалось выше, оборудованием для операции вытяжки облицовочных деталей обычно служат прессы двойного или тройного действия. Однако при вытяжке более простых относительно неглубоких деталей нередко применяют и прессы одинарного (простого) действия, оснащенные пневмогидравлическим буфером. Для вытяжки кузовных облицовочных деталей выпускают также специальные быстровытяжные прессы с пневмогидравлическим буфером. Кинематикой работы привода ползуна пресса предусматриваются замедленный его ход во время вытяжки детали и высокая скорость движения на участках свободного хода.

5. ШТАМПЫ ДЛЯ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ ПРЕССОВ

Формирование относительно глубоких деталей типа стакана, а также деталей других форм, требующих применения большого числа технологических операций, целесообразно выполнять на многопозиционных прессах-автоматах.

Общие требования к штампам для многопозиционных прессов следующие.

1. Расстояние от подштамповой плиты до «зеркала» рабочих частей нижней половины штампа должно быть одинаковым (с допускаемым отклонением $\pm 0{,}05$—0,1 мм). Оно определяется уровнем расположения грейферных линеек. Все штампы оснащаются ограничителями закрытой высоты, которые облегчают их установку и наладку.

2. Направляющие колонки устанавливают в верхней половине штампа, освобождая пространство для движения грейферных линеек с захватами. Прессовая посадка колонок в плиты

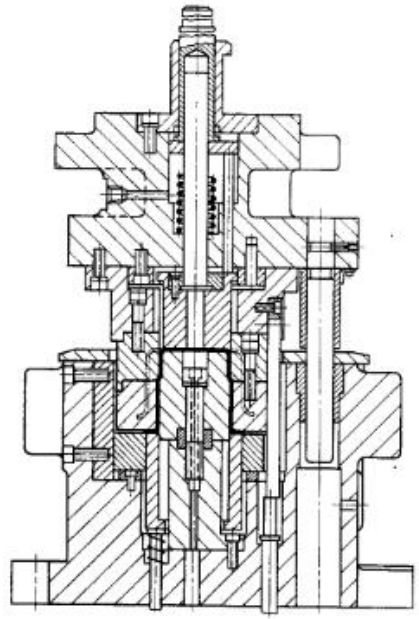


Рис. 141. Штамп для второй вытяжки

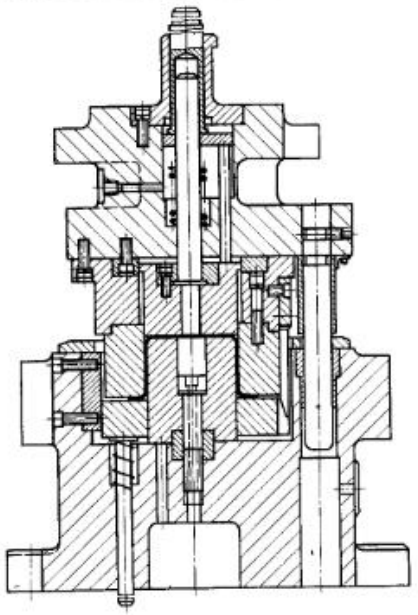


Рис. 140. Штамп для первой вытяжки

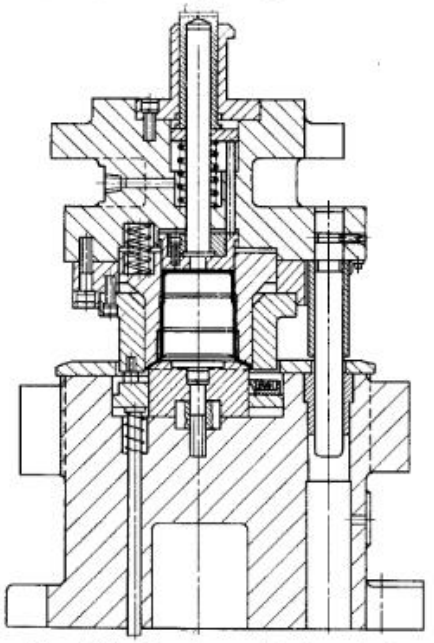


Рис. 142. Штамп для формовки фланца

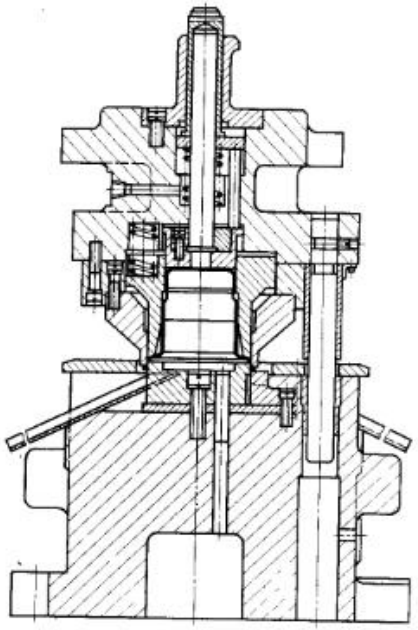


Рис. 143. Штамп для обрезки фланца

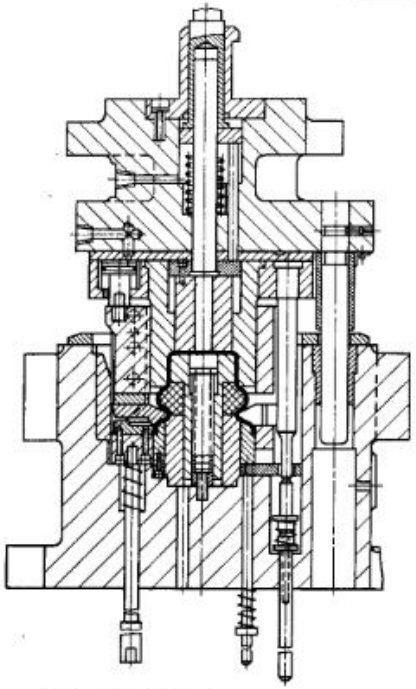


Рис. 145. Штамп для раздачи

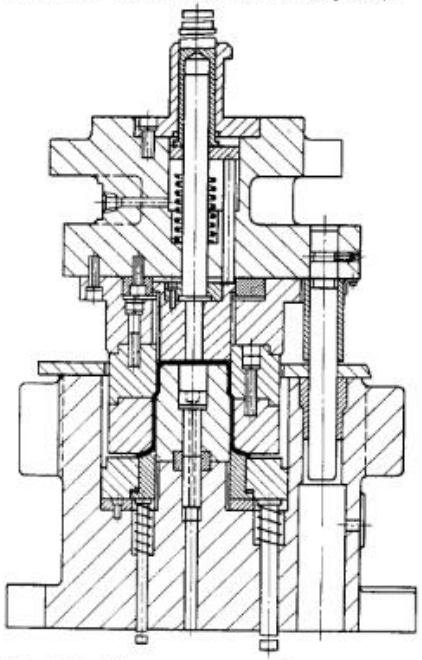


Рис. 144. Штамп для калибровки

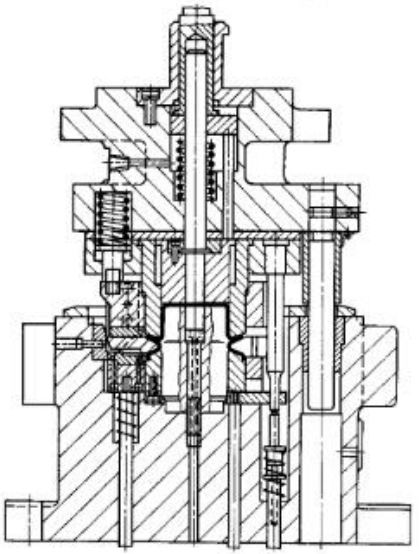


Рис. 146. Штамп для окончательной формовки

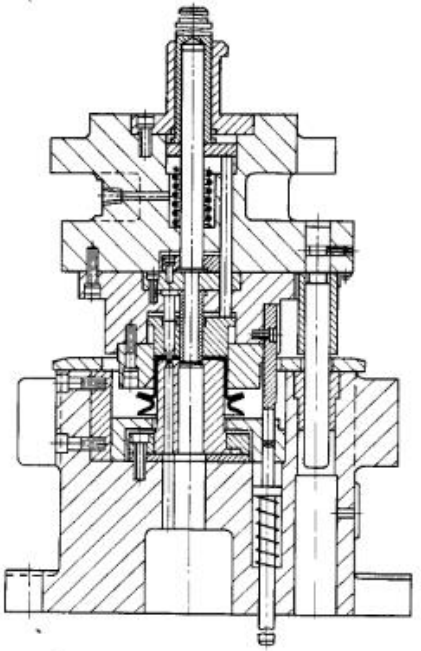


Рис. 147. Штамп для пробивки отверстий

должна усиливаться дополнительным креплением (преимущественно винтом).

3. Траектория движения захватов грейфера не должна пересекаться с колонками во время их возвратно-поступательного движения.

4. Необходимо предусматривать принудительное смазывание направляющих узлов (в системе колонок-втулок).

5. Все заготовки (полуфабрикаты) на каждой рабочей позиции после подачи их грейферным механизмом должны надежно фиксироваться в штампе (с помощью фиксаторов, встраиваемых в верхнюю половину штампа).

6. Для обеспечения устойчивого положения полуфабриката в зоне штампа при раздвигании грейферных линеек рекомендуется предусматривать прижим (отлипатель), смонтированный в верхней половине штампа.

7. Зазор между соседними штампами принимают 0,5—5 мм.

Вырубка заготовки в большинстве случаев производится отдельным (приставным) ползуном пресса и передается шиберным устройством в основную зону пресса, оснащенную грейферным механизмом. Для примера на рис. 140—147 показан типовой комплект штампов, установленных на многопозиционный пресс-автомат, начиная со второй операции (после вырубки заготовки), предназначенный для штамповки шкива.

6. ШТАМПЫ, СОВМЕЩАЮЩИЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ И ФОРМОИЗМЕНЯЮЩИЕ ОПЕРАЦИИ

В современном листоштамповочном производстве в общей массе применяемой штамповой оснастки значительную долю занимают штампы, совмещающие разделительные и формоизменяющие операции. Например, широко известны конструкции штампов, совмещающих следующие операции: вырубку заготовки с вытяжкой, отрезку заготовки с гибкой, последовательную гибку в сочетании с разделительными операциями (аналогично последовательную вытяжку в сочетании с разделительными операциями) и др. Принципиальные схемы работы штампов для выполнения элементарных операций вырубки, пробивки, гибки, вытяжки, отбортовки и др. сохраняются в совмещенных штампах, но они конструктивно взаимосвязаны между собой, кинематически обеспечивая получение готовой детали более сложной формы.

Число вариантов сочетаний различных операций в одном штампе очень велико, поэтому ограничимся иллюстрацией лишь нескольких примеров.

Пример 1 (рис. 148). *Пробивка отверстия, отрезка и гибка уголка по последовательной схеме.* Лента (исходный материал) подается слева направо от механизма автоматической подачи пресса. При первом рабочем ходе (с ручной подачей) производится только пробивка отверстия пуансоном *1* с фиксацией начала ленты до риски или предварительного упора (на рисунке не показаны). Последующее перемещение ленты выполняется до упора-противоотжима *8* вначале вручную (при отладке), а затем на автоматиче-

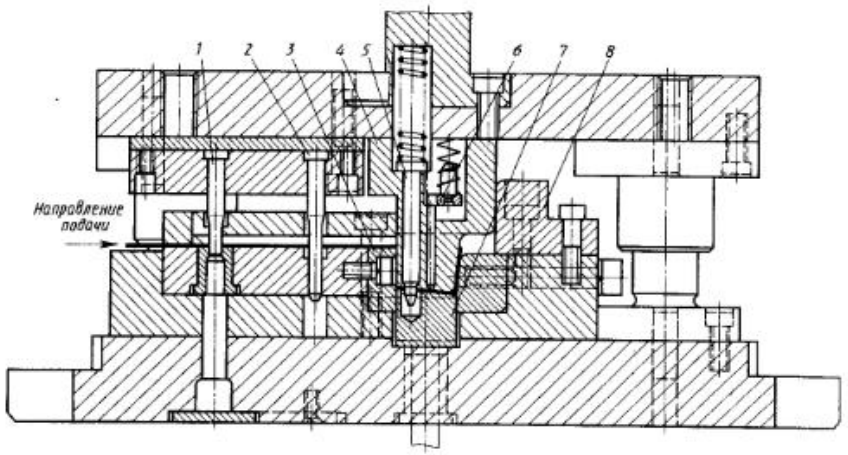


Рис. 148. Штамп для пробивки, отрезки и гибки

ском режиме. Фиксатор *2* уточняет расположение ленты в штампе в процессе штамповки и удерживает ее от сдвига, а ловитель *5* обеспечивает высокоточную фиксацию отрезанной заготовки во время гибки. Готовая деталь отделяется от пуансона *4* и ловителя *5* с помощью подпружиненного отлипателя *6*. Отрезанная заготовка защемляется прижимом *7* от буфера пресса. Пуансон *4* выполняет одновременно две операции: отрезку заготовки и ее гибку. Если представляется возможность, то в пуансон *4* встраивается нож-вкладыш, состыкованный с режущей секцией *3*. Целесообразно, чтобы ловитель *5* был подпружинен.

Пример 2 (рис. 149). *Гибка и формовка ребра жесткости.* Принципиальная схема работы штампа ясна из чертежа. Для формовки ребра жесткости применена подвижная система, состоящая из пуансона-вкладыша *1* и толкателей *2*. Их суммарный размер по высоте H_1 больше толщины H прижима *3* на высоту h ребра жесткости. Разъемные стяжки *4* скрепляют верхнюю часть штампа с нижней в момент установки штампа на пресс. Это значительно облегчает совмещение толка-

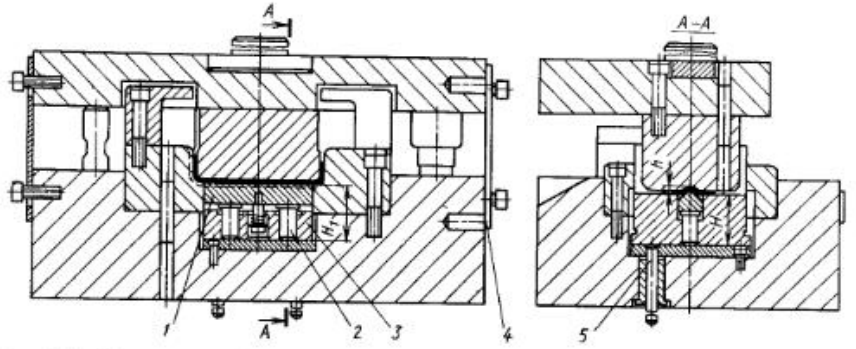


Рис. 149. Штамп для гибки и формовки ребра жесткости

телей *5* с отверстиями подштамповой плиты при использовании буфера пресса.

Пример 3 (рис. 150). *Проколка овального отверстия и отбортовка.* В тех случаях, когда нет возможности предварительно вырубить паз (отверстие) под отбортовку (при относительно малой высоте борта), процесс ведут по совмещенной схеме: проколка (прорыв) материала с последующей отбортовкой. Геометрия рабочей части пуансона *1* позволяет вести процесс разрыва металла плавно с постепенным образованием борта. Пуансон удерживается в державке штифтом *2*. Края борта имеют неровности, поэтому данный метод штамповки применяют в тех случаях, когда указанные дефекты отбортовки будут скрыты внутри детали (например, это допускается в жалюзи радиаторов).

Пример 4 (рис. 151). *Отрезка заготовки и свертывание втулки в одном рабочем ручье.* Из большого разнообразия схем штампов, применяемых для штамповки колец и втулок, особый интерес представляет вариант конструкции штампа, в котором образование кольца или втулки из отрезанной заготовки осуществляется подвижными (плавающими) секциями матрицы *5*. Заготовка, отрезанная ножом *2* и секцией матрицы *1*, в первый момент изгибается пуансоном *3* на оправке *4*, приобретая U-образную форму. Оправка *4* через державку *11* и толкатель *12* опирается на буфер пресса. При дальнейшем опускании ползуна концы полученного полуфабриката охватываются секциями матрицы *5*, и в совместном движении с оправкой *4* образуется втулка (кольцо). Движение секций матрицы ограничивается опорными вставками *6*, которые жестко закреплены в монтажной плите *9*. Благодаря наличию уклона во вставках и движению матрицы в вертикальном направлении концы заготовки совершают движение по сложной траектории, в результате чего трение между штампуемым материалом и инструментом сведено до минимума. Секции матрицы постоянно поддерживаются пружинами *7* и *8*. Готовые детали автоматически сбрасываются с оправки *4* шибером *10* от клинового механизма.

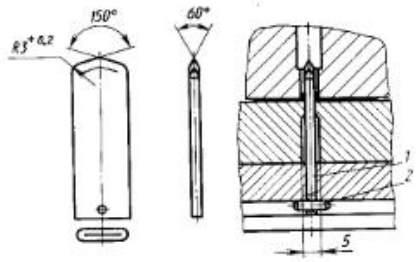


Рис. 150. Элемент конструкции штампа для проколки и отбортовки отверстия

Пример 5 (рис. 152). *Последовательная штамповка скобы с выполнением разделительных операций, отбортовки и гибки.* Последовательность размещения рабочих ручьев штампа понятна из схемы раскроя ленты (рис. 153). При такой схеме штамповки важно, чтобы края ленты были подготовлены (вырублены) для беспрепятственного проведения гибки.

Пример 6 (рис. 154). *Последовательная вытяжка в ленте.* Лента подается от механизма автоматически. В ручье *I* вырубается технологическое окно, которое представляет возможность свободно набирать материал для первой вытяжки (ручей *II*). Зона *III* свободна (холостая позиция). В ручьях *IV*—*VIII* выполняются операции последующих вытяжек, а в ручьях *IX* и *X* соответственно пробивка отверстия и обрезка с проталкиванием готовой детали в верхнюю часть штампа. Первая вытяжка осуществляется при участии складкодержателя-прижима *1*. В свободной позиции *III* установлен фиксатор *2*, который обеспечивает фиксацию ленты по внутреннему диаметру первой вытяжки. В процессе штамповки, при подъеме ползуна, прижимом *1* и съемником *3* лента приподнимается до уровня подачи.

Пример 7 (рис. 155). *Последовательная вытяжка в ленте с применением в штампе роликоклиновой подачи материала.* Конструкция штампа предназначена для штамповки мелких деталей типа пистона, поэтому складкодержатель в этом случае не применяется. В отличие от предыдущей конструкции

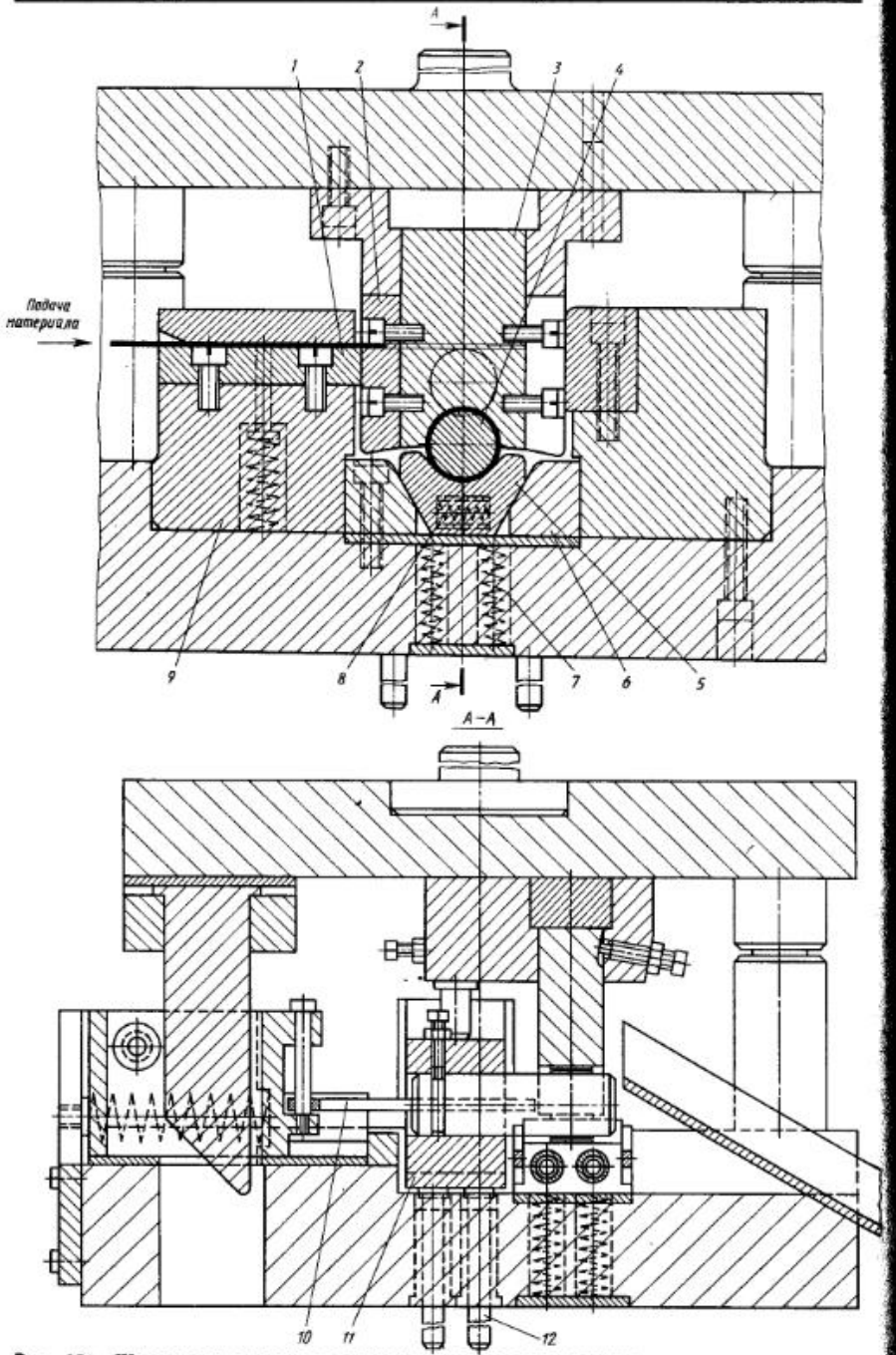


Рис. 151. Штамп для отрезки заготовки и свертывания втулки

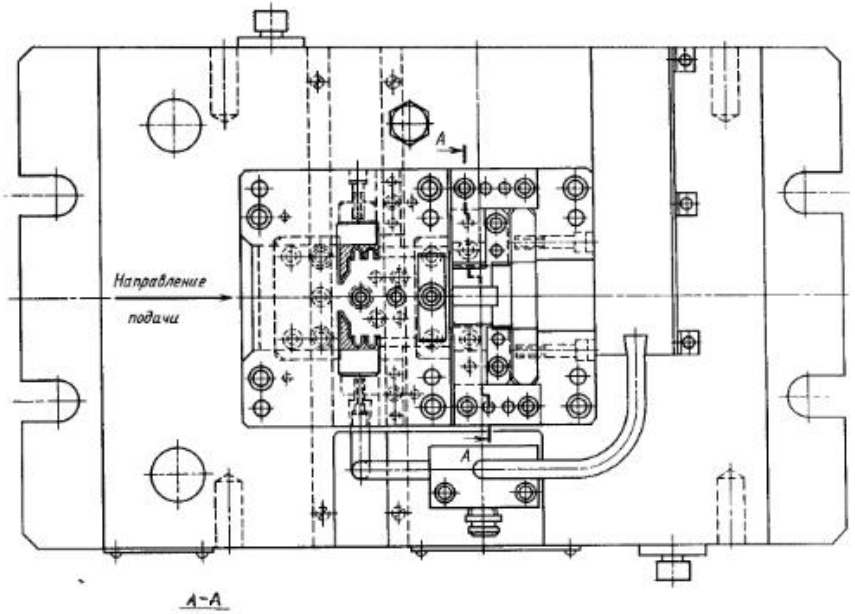


Рис. 152. Штамп для последовательной штамповки скобы

процесс штамповки производится дном вниз до жесткого удара по фланцу. Съем ленты с пуансонов выполняет жесткий съемник *1*. На выходе из штампа перфорированная лента разделяется ножом *2* на мелкие отрезки.

Пример 8 (рис. 156). *Последовательная штамповка детали, приведенной на рисунке.* В штамп встроен простой механизм автоматической подачи ленты. Высокоточное направление пуансонов обеспечивается съемником-прижимом *3* верхней части штампа, направленным по четырем колонкам *7*. К съемнику *3* прикреплена дополнительная плита *5*, служащая державкой

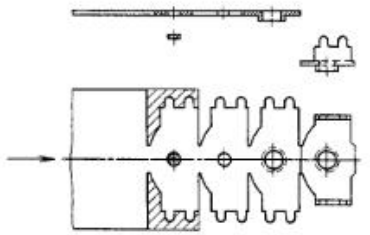


Рис. 153. Схема раскроя ленты

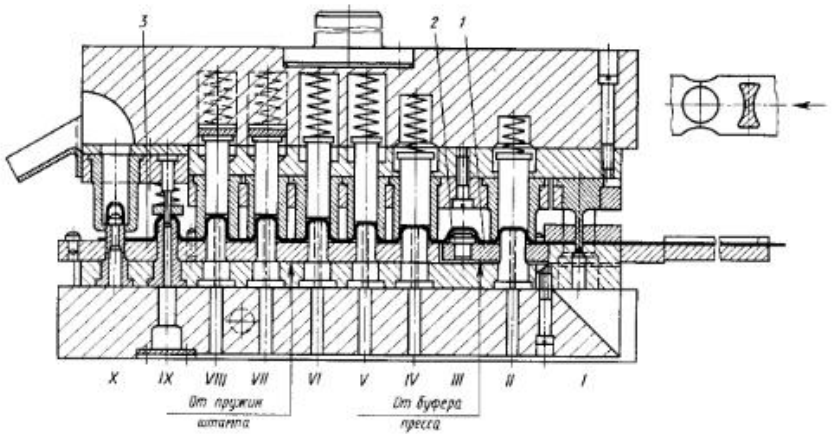


Рис. 154. Штамп для последовательной вытяжки в ленте колпачка дном вверх

для пуансонов *6*, выполняющих технологическую надрезку, и для втулок, фиксирующих пуансоны.

Штампуемая лента перемещается справа налево автоматически с помощью крючковой подачи. Тянущий крючок *1* смонтирован в каретке *8*, получающей возвратно-поступательное движение от клина *2* и пружины *9*. Клин прикреплен к съемнику-прижиму *3*. Рычаги *4* обеспечивают торможение ленты от перемещения вправо при возврате крючка *1* в исходное положение.

7. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ (ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ) ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПОВ

При рассмотрении процессов холодной листовой штамповки следует различать три условия работы: легкие, средние и тяжелые.

Такое деление условно, но оно облегчает выбор соответствующего материала для изготовления той или иной детали штампа.

Оценка условия зависит от масштабов производства, физико-механических свойств штампуемого материала и его толщины, удельной нагрузки и характера технологической операции.

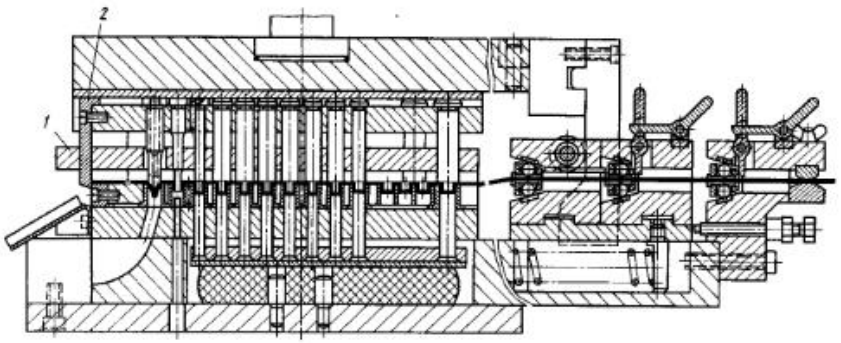


Рис. 155. Штамп для последовательной вытяжки деталей типа пистона с автоматической роликоклиновой подачей

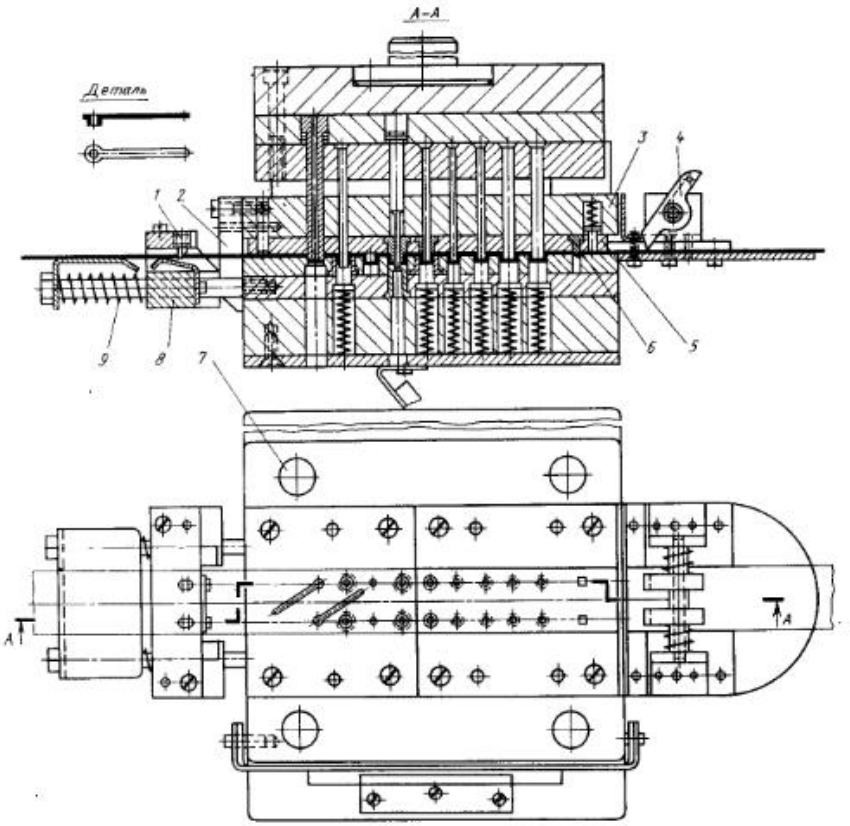


Рис. 156. Штамп для двухрядной последовательной штамповки с крючковой подачей

Масштаб производства определяет число необходимых рабочих ходов, которые должен совершить штамп за год или за весь срок службы. При единичном и мелкосерийном производстве, когда годовая программа выпуска ограничивается сотнями изготовленных деталей и только иногда несколькими тысячами деталей, применение высокостойких штампов не требуется. Если за среднюю производительность оператора при штамповке в течение 7 ч принять для первых операций 8000 рабочих циклов, а для вторых — 4000 рабочих циклов, то вся годовая программа на той или иной операции может быть выполнена за одну—две смены. Если предположить, что основной объект по конструкции не будет изменяться в течение ближайших пяти лет, то и в этом случае штамп должен работать всего не более недели, после чего его можно списывать в металлолом. Поэтому при конструировании таких штампов необходимо стремиться к их упрощению, а также изыскивать для их изготовления наиболее дешевые, хотя, может быть, и менее стойкие материалы.

Большинство разделительных штампов работают с твердыми рабочими частями, выполненными из инструментальных углеродистых и легиро-

ваиных сталей. Кроме того, в последнее время широко примеияют твердые сплавы, стойкость которых зиачительно выше стойкости сталей.

При иебольшой программе выпуска пуансоны и матрицы можно изготовлять из закаливаемых, но менее стойких сталей, а иекоторые их конструкции допускается выполиять из низкоуглеродистых сталей с последующей цементацией.

На выбор материала иепосредствеино влияет коифигурация изготовляемой детали. Если рабочие части штампа имеют сложную форму и нетехнологичиы для термической обработки, то для их изготовления следует выбирать высоколегированные стали, которые в меньшей степени подвержены короблению и обладают более прочной структурой после закалки. К таким сталям отиосятся преимущественно высоколегированные стали: Х12Ф1, Х12М, 9ХС, ХВГ и др. Эти же стали рекомендуется примеиять при тяжелых условиях работы. Заметим, что к тяжелым условиям следует отиосить выполиение процессов, связанных с обработкой толстых материалов, а также тонких, если рабочие части имеют ажурную форму и относительно малые сечения.

При ударных иагрузках рабочие части штампа необходимо изготовлять из сталей, обладающих большой вязкостью.

На выбор материала влияет также сортамент штампуемых материалов, который иепрерывно изменяется в результате появления материалов иовых марок. Одним материалам придают большую пластичность, для других одновременно с пластичиостью увеличивают прочность, например, для коррозионно-стойких сталей и т. д.

Но есть группа штампуемых материалов специального назначения, которым придают особые свойства, связанные с электропроводностью, магнитопроводностью и т. д. (например, электротехнические стали). Увеличение содержания в них некоторых компонентов приводит к тому, что штамповка иногда становится затруднительной и невозможной, т. е. наступает момент, когда качественный рост штампуемого материала оп режает технические возможности штампов. Например, появление высококремиистой тоиколистовой холодиокатаной стали поставило под сомиение дальнейшее примеиение имеющихся разделительных штампов; их стойкость ие удовлетворяла иуждам машиностроения. Потребовался качествеииый скачок, который и произошел в результате использоваиия в штампах твердосплавных рабочих частей.

Приведеиные выше рекомеидации дают только общее представление о материалах, примеияемых для изготовления рабочих частей штампов. Многие частные вопросы решаются на стадии проектироваиия и изготовления штампов.

Создание иовых и совершеиствоваиие современных материалов для деталей и узлов штампов идет в двух иаправлениях: 1) изыскаиие стойких пластических масс, значительно сокращающих сроки изготовления штампов; 2) повышеиие прочиостных характеристик твердых материалов.

Наиболее характерными материалами для изготовления деталей штампов в будущем станут полимеры. Распространенным видом полимеров является пластмасса. Пластические материалы, армированные стеклянными или синтетическими нитями или тканями, дают прочность, сравнимую со сталью. Но основной задачей ближайшего будущего является изыскание таких пластических материалов, которые по прочности и всем механическим свойствам превзойдут лучшие современные стали и сплавы.

Трудоемкость изготовления штампов с применением пластмасс составляет примерно 50 % трудоемкости изготовления цельнометаллических. Пластмассу применяют при изготовлении формообразующих штампов; вследствие малой твердости (*НВ* 22) их используют только в мелкосерийном производстве. При повышении прочности пластмассы можно будет применять и в штампах для серийного и крупносерийиого производства. Большим преимуществом пластмасс является их легкость (плотиость в 4—5 раз меньше плотности металла).

Твердые материалы для изготовления рабочих деталей штампов совер-

13. Механические свойства материалов, рекомендуемых для изготовления рабочих частей штампов

Материал	Термообработка	Предельная рабочая твердость	Допускаемое напряжение на смятие, МПа при нагрузке	
		$HRC_э$ (*НВ*)	статической	ударной
Резина марки 3820	Эластичная среда		140	—
Полиуретан СКУ-7Л ТТ (ГОСТ 22202—83)	То же		До 1000 (рабочее 100)	—
Пластмасса стиракрил		(12—15)	118—137	78—88
Самотвердеющая пластмасса типа АСТ-Т (акрилат)		(13—18)	176—235	118—157
Чугуи:				
СЧ 20	Естествеи-	(170—241)	255	108
СЧ 25	ное или	(180—250)	265	118
СЧ 30	искусствен-	(181—255)	294	127
специальный легированиый типа СЧШ *	ное старение	(190—260)	314	137
Сталь:				
литая медистая типа Е-4 **	Отжиг, нормализация	(170—220)	294—392	176—235
45Л-II	Поверхностная закалка	46—56	588—784	353—470
30Л-II; 35Л-II; 40Л-II	Отжиг, нормализация	(150—200)	245—294	118—147
15; 20	Цементация	59—63	980—1078	588—686
30; 35	Улучшение		216—274	108—137
40; 45; Ст5	»	37—40	294—343	147—176
45; 40Х	»	37—40	392—588	245—343
40; 45	»	42—46		
40Х; 5ХНТ	»	47—53	588—784	343—490
У7; У7А; У8А; У10А; 5ХГС; 5ХНВ	Закалка	57—61	2352—2646	1568—1760
Х12; Х13ВМ	»	56—61	2450—2740	1670—1760
9ХС; Х12Ф1; Х12М; Х6ВФ; ХВГ	»	57—63	2646—3140	1760—2160
40Х; 30ХГСА	»	42—51	2160—2352	1470—1568
7ХФ; 8ХФ; 9ХС; 9ХФ	»	59—63	2646—3140	1760—2160
65Г; 60С2; 60С2А	Закалка	46—49	2160—2352	1470—1568
ШХ15; Р18; Р9; ХГС; Р6М3; Р6М5	»	57—63	2646—2940	1760—1960

Продолжение табл. 13

Материал	Термообработка	Предельная рабочая твердость	Допускаемое напряжение на смятие, МПа при нагрузке	
		$HRC_э$ (*HB*)	статической	ударной
Твердые сплавы:				
ЦН-4; Сормайт	Закалка	*HRA* 83—85	3430—3920	2450—2744
ВК6М; ВК8; ВК10	»	*HRA* 86—88		
ВК15; ВК20	»	*HRA* 84—86		
ВК25; ВК30	»	*HRA* 83—85		

* Состав чугуна СЧШ: 3—3,3 % C; 1,6—2,2 % Si; 0,6—1 % Mn; 0,8—1,1 % Cr; 1,6—2,0 % Ni; 0,3 % P; 0,1 % S.

** Состав медистой стали Е-4: 0,55—0,65 % C; 0,3—0,4 % Si; 1,0—1,2 % Mn; 1,0—1,2 % Cr; 0,08—0,15 % Ti; 0,8—1,1 % Cu; 0,04 % P; 0,04 % S.

Примечания: 1. Азотирование сталей Х12М и Х12Ф1 повышает их поверхностную твердость и износостойкость. Толщина азотированного слоя 0,15—0,30 мм.

2. Хромирование углеродистых инструментальных сталей для штампов при вытяжных работах уменьшает коэффициент трения (примерно в два раза), повышает износостойкость и уменьшает налипание деформированного металла. Толщина хромированного слоя 0,01—0,02 мм.

3. Цементацию применяют для повышения поверхностной твердости деталей из низкоуглеродистых сталей до 59—63 $HRC_э$. Глубина слоя 0,5—1,0 мм.

4. Твердые сплавы (кроме ЦН-4 и Сормайта) применять при прочном бандажировании.

14. Материалы, рекомендуемые для изготовления основных деталей штампа в зависимости от условий работы

Тип штампа	Деталь штампа	Условия нагружения	Марка материала	Твердость
Для разделительных операций (вырубка, пробивка, обрезка и др.)	Пуансон, матрица, пуансон-матрица	Легкие, средние Тяжелые	Стали: У8А, У10А, У10 Стали: 9ХС, Х12М, Х12Ф1, ХВГ, 9ХВГ, 7Х3, Р6М5, ШХ15	Пуансон 55—59 $HRC_э$ Матрица 57—61 $HRC_э$
			Твердые сплавы	84—86 *HRA*

Продолжение табл. 14

Тип штампа	Деталь штампа	Условия нагружения	Марка материала	Твердость
Для формоизменяющих операций (гибка, вытяжка, отбортовка, формовка и др.)	Пуансон, матрица, пуансон-матрица, прижим, их секции	Легкие, средние Тяжелые	Стали: У8А, У10А, Х12 Стали: Х12М, Х12Ф1, Х6ВФ, Р6М5	Пуансон 55—59 $HRC_э$ Матрица 57—61 $HRC_э$
			Твердые сплавы	86—88 *HRA*
Для формоизменяющих операций крупногабаритных (облицовочных) деталей	Пуансон матрица, прижим, выталкиватель	Средние Тяжелые	Специальный легированный чугун Основание: чугун СЧ 30, армированный стальными секциями	190—260 *HB* 181—255 *HB*
Для калибровки, чеканки и других работ «на удар»	Пуансон, матрица, выталкиватель	Средние Тяжелые	Стали: У8А, У10А, 7НФ Стали: 8ХФ, 9ХФ, 9ХС, Х6В8, Р6М5	55—59 $HRC_э$
			Твердые сплавы	86—88 *HRA*
	Плиты (верхняя и нижняя)	Легкие, средние Тяжелые	Чугуны: СЧ 20, СЧ 25, СЧ 30 Стальные отливки: 35Л-II, 40Л-II, 45Л-II	170—255 *HB*
Все типы штампов	Державки пуансонов и матриц	При всех условиях	Стали: 40, 45	34—40 $HRC_э$

Продолжение табл. 14

Тип штампа	Деталь штампа	Условия нагружения	Марка материала	Твердость
	Державки быстросменных пуансонов		Сталь 45	42—46 $HRC_э$
	Державки с шариковым креплением пуансонов		Сталь 20	59—63 $HRC_э$ (после цементации)
	Съемник, выталкиватель	Легкие	Стали: 20, Ст3	В состоянии поставки
		Средние	Стали: 40, 40Х, 45	42—46 $HRC_э$
		Тяжелые	Стали: У8А, 5ХНТ, 5ХНМ	51—55 $HRC_э$
	Клии, ползушки малых и средних размеров	Легкие	Сталь У8А	53—57 $HRC_э$
		Средние, тяжелые	Стали: У10А, Х12М, 5ХГС	57—61 $HRC_э$
Все типы штампов	Клии, ползушки крупногабаритные с накладными плаиками	—	Чугуны: СЧ 25, СЧ 30	180—255 HB
			Стали: 40, 45	—
	Плаика накладиая	Легкие	Сталь 20	59—63 $HRC_э$ (после цемеитации)
		Средние, тяжелые	Стали: У10А, Х12М	57—61 $HRC_э$
	Плитки подкладные для пуансоиов и матриц, для ползушек	Легкие, средние	Сталь 45	42—46 $HRC_э$
		Тяжелые	Сталь У8А	51—55 $HRC_э$
			Сталь 20	59—63 $HRC_э$ (после цемеитации)
	Противоотжимы и плаики к иим	Легкие, средние	Сталь У10А	—
		Тяжелые	Сталь Х12М	57—61 $HRC_э$
	Плаики иаправляющие	—	Сталь 20	59—63 $HRC_э$ (после цемеитации)
			Стали: 40, 45	42—46 $HRC_э$
	Фиксаторы	—	Стали: У8А, У10А	51—55 $HRC_э$
	Упоры	—	Стали: 45, 40Х	42—46 $HRC_э$

Продолжение табл. 14

Тип штампа	Деталь штампа	Условия нагружения	Марка материала	Твердость
Для формоизменяющих и разделительных операций	Пружины, эластичная среда в роли матрицы и пуансона	До давления 100 МПа	Полиуретан СКУ-7Л ТТ (ГОСТ 22202—83) Литьевые полиуретаны (ТУ 84-404—78) (прямоугольной и цилиндрической формы) Заменитель — резииа 3826	76—86 (среднее значение 82) по Шору А

Примечания: 1. К тяжелым условиям работы относятся: нагружение рабочих частей до предельно допустимых нагрузок; относительно тонкие стенки матрицы и пуансонов; высокая «плотность» размещения рабочих контуров; работы на повышенных скоростях; эксплуатация штампа при массовом выпуске деталей. По разделительным операциям: вырубка, пробивка электротехнических сталей, углеродистых и легированных сталей с твердостью после термической обработки до 50 $HRC_э$ и особенно, когда не допускаются заусенцы в детали. По формоизменяющим операциям: вытяжка с утонением стенок детали; калибровка деталей при повышеиных требованиях к точности размеров; прецизионная штамповка.

2. К легким условиям работы относятся: нагружение рабочих частей с высоким запасом прочности; эксплуатация штампов при относительно малых партиях штампуемых деталей (мелкие серии).

3. К средним условиям нагружения рабочих частей относятся такие, при которых работают штампы в серийном производстве с годовой программой штамповки ориентировочно до 100 тыс. деталей, перерабатывающих в основном высокопластичные и другие металлы с пределом прочности ие более 500 МПа. Эта категория штампов является преобладающей в промышленности.

шествуют в различных иаправлениях. Особенио важно добиться повышеиия допускаемых удельиых нагрузок, твердости и сопротивлеиия истиранию.

Увеличения допускаемых удельиых нагрузок добиваются измеиеиием содержаиия легирующих элемеитов в высоколегированиых сталях.

Одним из эффективиых иаправлений является использоваиие и совершеиствоваиие магииевого и модифицированиого чугуиов, обладающих высокими механическими и антифрикционными свойствами. В иастоящее время создают новые стали с твердостью, близкой к порошковым материалам. Одиовремеиио эти стали должиы иметь высокую прочность иа изгиб, и иа сжатие, повышеииый предел выиосливости, хорошую техиологичность при обработке. Кроме того, нередко требуется, чтобы штамповые стали обладали устойчивостью против отпуска и высокой прокаливаемостью.

Твердые (порошковые) сплавы уже сейчас широко примеияют в производстве, а в будущем оии постепеиио вытесняют закаливаемые детали штам-

па. Их можно использовать для изготовления всех разделительных и формообразующих штампов.

В разделительных штампах, изготовленных из твердых сплавов, по сравнению со штампами из сталей более продолжительное время сохраняется в надлежащем виде режущая кромка при стабильном технологическом зазоре. Высокая твердость этих материалов позволяет легко разделять относительно хрупкие и термообработанные материалы. Такие штампы экономичны, — в результате уменьшения числа заточек увеличивается выпуск продукции и сокращается простой оборудования.

В формообразующих штампах твердые сплавы, кроме повышения стойкости, обеспечивают заданные параметры шероховатости поверхности и стабильную высокую точность штампуемых деталей. При использовании этих сплавов исчезают такие вредные явления, как прилипание штампуемого материала к рабочим частям штампа и образование задиров.

В табл. 13 приведены механические характеристики некоторых материалов, рекомендуемых для изготовления рабочих частей штампов листовой штамповки, а в табл. 14 конкретные рекомендации по их применению.

Глава 19 СТОЙКОСТЬ ШТАМПОВ

Понятие о стойкости штампов. В процессе эксплуатации штампов наиболее часто приходят в негодность их основные рабочие части — матрицы и пуансоны. Поэтому следует различать:

полную стойкость штампа, определяемую числом деталей, отштампованных до полного изнашивания его рабочих частей, и получением размерного брака штампуемых деталей;

промежуточную (качественную) стойкость или стойкость между двумя переточками (для устранения заусенцев при вырубке—пробивке) или между зачистками рабочих частей для устранения заднров, рисок и царапин при вытяжке, гибке.

Полная стойкость штампов непосредственно связана с промежуточной стойкостью, так как число допустимых переточек и зачисток ограничено полным использованием рабочих деталей штампов или получением размерного брака деталей.

Стойкость штампа до полного изнашивания

$$T = nNn_1, \qquad (1)$$

где n — число переточек; N — число нагружений на период между двумя переточками; n_1 — число рабочих мест в штампе.

Стойкость штампа до переточки рабочих частей имеет большое значение для обеспечения его бесперебойной работы в производственных условиях. Экономичность штампа характеризуется стойкостью его рабочих частей до полного изнашивания, поскольку стоимость изготовления последних для большинства типов штампов составляет 65—80 % стоимости всего штампа.

Характеристика условий работы режущих кромок вырубных и пробивных штампов. Исследованиями В. П. Романовского установлено, что удельная нагрузка на режущие кромки при вырезке стальных деталей равна

$$p_{max} = 3{,}12\left(k\frac{s}{d} + 1\right)\sigma_в, \qquad (2)$$

где k — коэффициент, зависящий от величины зазора z; s и d — соответственно толщина заготовки и диаметр отверстия;

$z =$	$0{,}15s$	$0{,}10s$	$0{,}05s$	$0{,}025s$	$0{,}005s$
$k =$	2,0	2,38	3,33	4,1	5,0

При чистовой вырубке сопротивление разделению (сдвигу) выше, чем при обычной вырубке, и составляет

$$\sigma_{сд} = \left(m\frac{s}{d} + 0{,}75\right)\sigma_в, \qquad (3)$$

где коэффициент $m = 3{,}0$ при $z = 0{,}005s$ (беззазорная вырубка); $m = 2{,}5$ при $z = 0{,}025s$.

Максимальная удельная нагрузка на режущие кромки пуансонов при чистовой вырубке (без противодавления) при $z = 0{,}005s$ равна

$$p_{max} \approx 3{,}9\left(4\frac{s}{d} + 1\right)\sigma_в, \qquad (4)$$

а с учетом противодавления

$$p'_{max} \approx 4{,}5\left(4\frac{s}{d} + 1\right)\sigma_в. \qquad (5)$$

Удельная нагрузка на режущие кромки матриц при чистовой вырубке несколько ниже нагрузки пуансонов и составляет

$$p_{max_м} \approx 3{,}6\left(4\frac{s}{d} + 1\right)\sigma_в. \qquad (6)$$

На рис. 1 приведена зависимость $p_{max}/\sigma_в$ от относительной толщины (s/d) заготовки, действительная для различных марок углеродистой и коррозионно-стойкой сталей. Так как с увеличением отношения s/d удельная нагрузка резко возрастает, то для режущих частей штампов различных

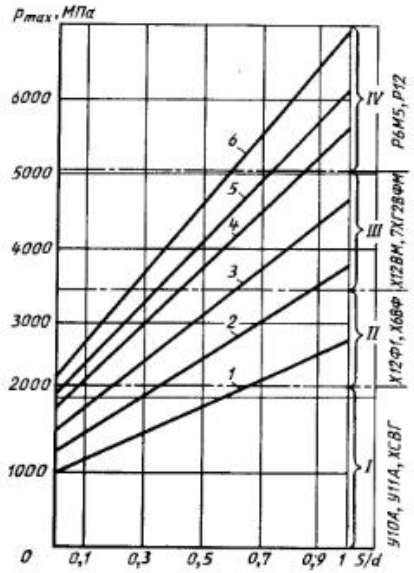


Рис. 1. Зависимость относительной локальной удельной нагрузки режущих кромок $P_{max}/\sigma_в$ от относительных размеров детали или отверстия s/d:

1 — чистовая вырубка при $z = 0{,}005\,s$; *2* — беззазорная вырубка при $z = 0{,}005\,s$; *3* — вырубка при $z = 0{,}05\,s$; *4* — вырубка при $z = 0{,}01s$; *5* — вырубка при $z = 0{,}15s$; *6* — данные фирмы «Файнтул»

размеров рекомендуется применять разные типы штамповых сталей, обладающих различной прочностью и износостойкостью.

Для создания нормальных условий разделения обрабатываемого материала в штампах необходимо, чтобы режущие кромки в зоне контактного пояска не подвергались смятию, не выкрашивались и обладали высокой износостойкостью.

Выбор материалов для рабочих частей разделительных штампов и их изиосостойкость. Современное производство приборов электронной и вычислительной техники, различного рода радиотехнических и других устройств характеризуется частой сменой объектов производства и увеличением доли деталей изготовляемых небольшими партиями.

Для мелкосерийной штамповки непременное требование высокой стойкости, весьма важное для разделительных штампов массового пронзводства, отходит на второй план. Важнейшей задачей здесь является снижение трудоемкости и металлоемкости специальных штампов. Этого можно достичь при изготовлении рабочих частей разделительных штампов из многократно используемых материалов (например, литейных сплавов, которые периодически подвергаются переплавке), а также использованием в групповых штампах термически необработанных матриц.

В настоящее время наибольшее распространение получили вырубные штампы, в которых матрицу изготавливают из сплава на основе цинка (сплав ЭКВ), а пуансон — из углеродистой или инструментальной стали с закалкой до *HRC* 56—60.

Химический состав сплава ЭКБ: 3,5—4,5 % Al; 3,0—4,0 % Cu; 0,2—0,8 % Mg; 0,3—0,6 % Si. Механические свойства: $\sigma_в = 250$ МПа; $\delta_{10} = 1$ %; *HB* 135. Температура плавления $t_{пл} = 395$ °С; усадка 0,82 %.

Штампы из сплавов на основе цинка рекомендуется применять для вырубки деталей из материалов толщиной до 3 мм, имеющих предел прочности $\sigma_в \leqslant 450$ МПа, а материалов с $\sigma_в > 450$ МПа — толщиной до 1,5 мм.

Стойкость штампов с матрицами из сплава ЭКБ можно оценивать по следующей формуле:

$$T = 0{,}2K_1K_тK_ф10^4, \qquad (7)$$

где K_1, $K_т$, $K_ф$ — коэффициенты, учитывающие соответственно механические свойства и толщину штампуемого материала, тип штампа и сложность контура штампуемой детали.

Стойкость штампов из сплава ЭКБ приведена в табл. 1. Износостойкость разделительных штампов с литыми матрицами из сплава на основе цинка при вырубке—пробивке высокопрочных сталей с пределом прочности $\sigma_в \leqslant 1250$ МПа характеризуется графиками (рис. 2). Из графиков $F_{м.т.ср} = f(N)$ и $F_{м.б.ср} = f(N)$ можно заключить, что процесс изнашивания режущего контура матрицы

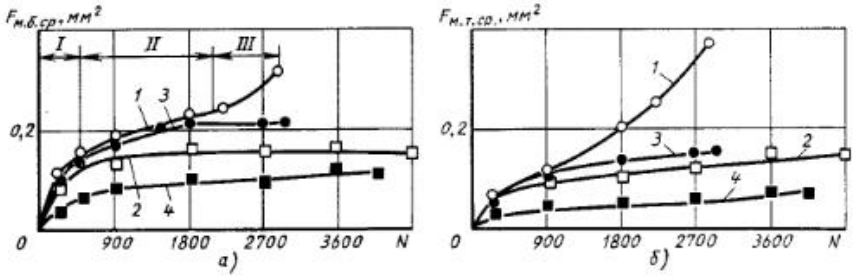


Рис. 2. Изменение суммарного бокового $F_{м.б.ср}$ (*а*) и торцового $F_{м.т.ср}$ (*б*) износа в зависимости от числа N нагружений;

1 — сталь 1Х17Н5М3 ($s = 1$ мм); *2* — сталь 1Х17Н5М3 ($s = 0{,}6$ мм); *3* — сталь 12Х18Н10Т ($s = 1$ мм); *4* — сталь 12Х18Н10Т ($s = 0{,}5$ мм)

характеризуется стадийностью (*I*—*III*). В ряде случаев наличие третьей стадии изнашивания необязательно, так как уже на стадии замедленного изнашивания качество штампуемых деталей не удовлетворяет требованиям производства.

В результате применения штампов с матрицами из цинковых сплавов (пуансон—сталь Х12М) при штамповке высокопрочных сталей получают детали по 11—14 квалитету; стойкость матрицы до переточки от 2 до 4,5 тыс. нагружений. Время на изготовление матрицы по сравнению со стальной матрицей сокращается в 5—6 раз. Кроме того, полностью исключаются ручные работы по подгонке рабочих контуров матрицы и пуансона.

В ленточно-ножевых штампах с сопряженными режущими кромками в качестве матрицы применяют стальную термически обработанную ленту, поставленную на ребро между матрицедержателем и пуансонодержателем и заточенную под углом 35° так, что на торце остается небольшая площадка. Толщину ленты выбирают в зависимости от толщины и механических свойств штампуемого металла; при-

1. Стойкость штампов с матрицами из сплава ЭКБ при вырубке — пробивке деталей простого контура

Материал		Стойкость штампа до переточки, число нагружений		Высота заусенца, мм	
Марка	Толщина, мм	Пробивка	Вырубка	Пробивка	Вырубка
Л63	0,3	2000	2000	0,05	0,03
	0,5	1000	2000	0,08	0,07
	1,0	1000	1500	0,12	0,08
	2.0	100	1200	0,20	0,12
АМцМ	0,5	2500	2500	0,05—0,06	0,03—0,04
	1,0	2000	2000	0,06—0,07	0,05—0,06
Сталь:					
45	0,5	600	1500	0,15	0,08
	1,0	100	1000	0,15	0,10
60С2А	0,3	100	600	0,15	0,10
1513	0,35	100	500	0,15	0,10

2. Экспериментальные значения стойкости (число нагружений) матриц

Штампуемый материал		Диаметр инструмента, мм		Материал матрицы			
Марка	Толщина, мм	матрицы	пуансона	В95	Сталь 45	У10А	30ХГСА
АМцМ	1,0	16,2	16,2	8000	12 600	13 300	14 700
	1,5	16,2	16,1	5600	8 700	9 800	11 000
	2,0	16,2	16,0	4300	6 500	7 800	9 000
	2,5	16,2	15,9	3600	5 300	6 300	7 500
	3,0	16,2	15,9	3000	4 500	5 400	6 400
АМцП	1,0	16,2	16,1	7000	12 000	12 800	14 400
	1,5	16,2	16,1	5000	8 400	8 700	10 300
	2,0	16,2	16,0	4000	6 300	6 900	8 000
	2,5	16,2	15,9	3400	5 200	5 500	6 500
	3,0	16,2	15,9	2700	4 300	4 700	5 600
АМг6-БМ	1,0	16,2	16,1	7000	10 500	11 500	12 800
	1,5	16,2	16,1	4300	7 100	8 700	9 400
	2,0	16,2	16,0	3400	5 500	6 300	7 600
	2,5	16,2	15,9	2600	4 400	5 200	6 300
	3,0	16,2	15,9	2000	3 800	4 400	5 400
Сталь 10	0,5	16,2	16,1	1300	5 400	6 100	6 800
	1,0	16,2	16,1	500	1 200	1 600	2 000
	2,0	16,2	16,0	200	500	600	800
	3,0	16,2	15,9	140	300	400	500

ближенно ее можно рассчитать по формуле

$$s_д \approx (1 + 0{,}3s)\,\frac{\sigma_в + 40}{40}. \qquad (8)$$

Ширину площадки можно определить по формуле

$$b = 0{,}2\,(s + 1). \qquad (9)$$

Материал пуансон-матрицы в штампе с сопряженными режущими кромками — сталь 40 или сталь 45 (пластина толщиной 4—6 мм), термически обработанная до *HRC* 36—40.

Полная стойкость некоторых типов упрощенных штампов для разделительных операций, по данным Д. А. Вайнтрауба, в отношении к полной стойкости стационарных штампов для тех же деталей, принятой за единицу, характеризуется следующими данными; листовой пинцетный 0,02—0,04; пластинчатый подкладной 0,03—0,05; пластинчатый с электромагнитным креплением 0,2—0,3; пластинчатый с механическим креплением 0,2—0,3; пакетный со стальными рабочими частями 0,8—0,9; пакетный с рабочими частями из цинково-алюминиевого сплава 0,1—0,15; ленточно-иожевой 0,30—0,40.

В работах Я. О. Рудермана исследована стойкость термически необработанных матриц из сталей 45, У10А, 30ХГСА и алюминиевого сплава В95 при штамповке алюминиевых сплавов в мелкосерийном приборостроении (табл. 2).

За критерий стойкости термически необработанных матриц принята высота заусенца, определяемая по эмпирической формуле

$$h_з = 0{,}03K\sqrt{s}, \qquad (10)$$

где K — коэффициент, зависящий от толщины штампуемого металла; для $s = 1 \div 3$ мм $K = 5$.

Из табл. 2 видно, что стойкость стальных термически необработанных матриц является достаточной для мелкосерийного производства листовых каркасных деталей в приборостроении, так как примерно 94 % таких деталей изготовляют до 10 тыс. шт. в год. Алюминиевый сплав В95 рекомендуется для изготовления групповых пластинчатых штампов больших габаритов, а также для изготовления каркасных деталей малыми партиями.

В условиях крупносерийного и массового производства рабочие части разделительных штампов (пуансоны и матрицы) рекомендуется изготовлять из износостойких материалов, обеспечивающих максимальную производительность при высокой стойкости штампов.

Износостойкость инструментальной стали зависит от ее структуры и свойств, а также от изнашивающей способности обрабатываемого материала.

Износостойкие стали разделяют на три группы [19]:

стали умеренной износостойкости с содержанием углерода 0,8—1,2 %, в структуре которых присутствуют избыточные карбиды цементитного типа MC_3[1];

стали повышенной износостойкости, в структуре которых содержатся карбиды M_7C_3. Износостойкость этих сталей, имеющих более твердые карбиды, выше. При увеличении содержания карбидов M_7C_3 с 11—12 % (сталь Х6ВФ с 1 % С и 6 % Cr) до 14—15 % (сталь Х12М с 1,6 % С и 12 % Cr) износостойкость вырубных штампов повышается в 2 раза;

стали высокой износостойкости содержат в структуре, кроме карбидов M_7C_3, карбиды МС (карбиды ванадия). В этом случае износостойкость возрастает дополнительно, поскольку карбид МС имеет более высокую твердость (*HV* 2000), чем карбид M_7C_3.

Выбор сталн для изготовления рабочих частей разделительных штампов определяется главным образом их конфигурацией и изнашивающей способностью обрабатываемого материала. Для пуансонов и матриц вырубных, пробивных и обрезных штампов простой формы толщиной или диаметром до 25 мм рекомендуется применять инструментальные стали У8А, У10А, У11, которые после правильно выполненной термической обработкн обладают такой же твердостью и прочностью, как и многие легированные стали. Основными недостаткамн углероднстых сталей являются их низкая прокаливаемость и чувствительность к поводке и короблению при термической обработке.

Для изготовления пуансонов и матриц вырубных, пробнвных и обрезных штампов сложной формы (прн высоких удельных нагрузках) целесообразно применять легированные инструментальные стали: Х12М, Х12ВМ, Х12Ф1, Х6ВФ, 7ХГ2ВМ и др.

Высокохромистые стали обладают высокой прокаливаемостью, что позволяет использовать их для рабочих частей штампов больших сечений и применять закалку с умеренным охлаждением, что уменьшает их поводку и коробление.

При вырубке с умеренными удельнымн нагрузками лучшая стойкость у штампов небольших габаритов (до 30—40 мм) из сталей с содержанием 12 % Cr, имеющих больше карбидной фазы. Прн вырубке с большими ударными нагрузкамн более высокая стойкость у крупных штампов с рабочнми частямн нз стали Х6Ф4М, характеризуемой пониженной шлифуемостью из-за наличия карбидов ванадия (МС). Рабочие части штампа нз стали Х6Ф4М следует шлнфовать кубическим нитрндом бора.

Наиболее оптимальное сочетание свойств, предъявляемых к материалам вырезных штампов, имеет сталь 11Х4В2Ф3С2М. Ее следует рекомендовать прежде всего для изготовления рабочих частей тяжелонагруженных

[1] М обозначает в общем виде металл, участвующий в образовании карбида.

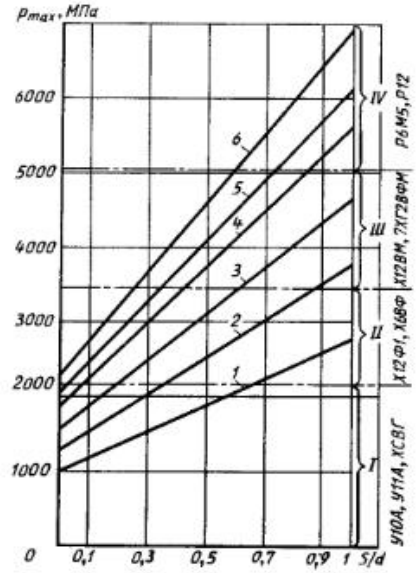


Рис. 3. Локальная удельная нагрузка режущих кромок (максимальные напряжения) в зависимости от отношения s/d (при $z = 0{,}15s$);

1 — сталь 08кп; *2* — сталь 20 и Ст3; *3* — сталь 30; *4* — сталь 45; *5* — сталь 12Х18Н10Т; *6* — сталь 65Г; *I—IV* — области рекомендуемого применения различных марок штамповых сталей

вырубных и пробивных штампов. Производственные испытания штампов на ряде предприятий страны показали, что средняя стойкость до полного изнашивания из стали 11Х4В2Ф3С2М в 1,5—2 раза выше стойкости штампов из стали Х12М.

При пробивке отверстий небольшого диаметра в коррозионно-стойких и высокопрочных сталях иглы-пуансоны воспринимают очень высокие удельные нагрузки, поэтому стали, из которых изготовляют такие пуансоны, не должны содержать аустенит. Иглы-пуансоны изготовляют из быстрорежущих сталей Р12 и Р6М5 или из полутеплостойкой стали 6Х4М2ФС.

Иглы-пуансоны закаливают с пониженных температур (с 1200—1220 °С), Р6М5 с 1190—1210 °С, Р8М3 с 1200—1220 °С; при этом необходимо предупредить обезуглероживание. После отпуска (550—560 °С) для быстрорежущих сталей обязательны тщательное шлифование и отпуск при 400 °С, 30 мин для снятия напряжений. Для пробивки отверстий в мягких металлах, а также больших отверстий и в более твердых металлах наряду со сталью Х6ВФ рекомендуется сталь 13Х с отпуском при 150—160 °С для получения твердости *HRC* 62—63.

На рис. 3 приведены абсолютные значения максимальной удельной нагрузки режущих кромок пуансонов в зависимости от отношения s/d для обычной вырубки—пробивки при оптимальной величине двустороннего технологического зазора $2z = 0{,}15s$ для наиболее распространенных штампуемых материалов; указаны ориентировочные границы областей рекомендуемого применения различных типов термообработанных штамповых сталей.

При вырубке—пробивке тонколистовой ($s = 1{,}0$ мм) горячекатаной электротехнической стали марок 1211 и 1212 стойкость штампов из стали Х12М превышает стойкость штампов из стали У10А в 5,8 раза, из стали ХВГ в 3,1 раза, из стали ШХ15 в 2,9 раза.

Стойкость режущих элементов универсально-сборных штампов (УСШ) из стали Х12М при штамповке толстолистовой стали Ст3 ($s = 5 \div 8$ мм) в 1,5—1,8 раза выше, чем из стали У8А; в 1,3—1,37 раза выше, чем из сталей ХВГ и ШХ15; в 1,25—1,28 раза выше, чем из стали 5ХВ2С.

Стойкость режущих элементов УСШ из стали Х12М при штамповке деталей из труднодеформируемой толстолистовой стали 12Х18Н10Т ($s = 4 \div 10$ мм) в 2,7—3,5 раза выше, чем из стали У8А.

Из приведенных данных видно, что сталь Х12М имеет бесспорные преимущества по сравнению с другими испытываемыми сталями.

Методы расчета стойкости штампов. Стойкость штампов зависит от многих конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов: 1) толщины и механических свойств штампуемого материала; 2) конфигурации штампуемой детали; 3) относительной толщины материала; 4) формы рабочих граней матрицы и пуансона; 5) величины технологического зазора; 6) скорости деформирования; 7) материала и термической обработки рабочих частей штампа; 8) состояния боковой рабочей поверхности пуансона; 9) величины технологических перемычек; 10) способа крепления пуансонов и типа направляющих устройств; 11) типа смазочного материала и способа его нанесения; 12) точности системы пресс—штамповый блок; 13) системы планово-предупредительных ремонтов.

Влияние конструктивно-технологических факторов на стойкость разделительных штампов рассмотрено в работах [26; 45; 65].

Расчетно-аналитический метод. Использование этого метода, основанного на обобщении статистических данных, позволяет заранее рассчитать потребное число штампов, необходимое для выполнения производственной программы, и более обоснованно решать вопросы планирования подготовки производства.

Рассмотрим расчетные формулы для определения стойкости вырубных и пробивных штампов, предложенные различными авторами.

Формула Беньи для определения стойкости (числа нагружений) штампа до полного изнашивания имеет следующий вид:

$$T = \frac{h}{h_1} T_a = \frac{z_{max} - z_{min}}{2 \operatorname{tg} \alpha_2 h_1} T_a K_f K_t K_{s2} K_a K_s K_b, \quad (11)$$

где h — суммарная высота допустимого для шлифования слоя за все переточки; $h = \frac{z_{max} - z_{min}}{2 \operatorname{tg} \alpha_2}$; α_2 — уклон стенок матрицы; h_1 — величина сошлифовываемого слоя при переточке матрицы; T_a — исходная стойкость, обычно равная 25 тыс. нагружений плюс 20 % (в зависимости от условий работы штампа); z_{max} — технологический зазор, мм (для материалов толщиной 0,05—6 мм $z_{max} = 10 \div 20$ % от s); $z_{min} = (0{,}4 \div 0{,}5) z_{max}$; K_f — коэффициент, учитывающий тип штампа (для вырубного штампа K_f 1,0; для пробивного или комбинированного $K_f = 0{,}8$); K_t — коэффициент, учитывающий характер направления рабочих частей (без направления $K_t = 0{,}8$; при пакетном направлении $K_t = 1{,}0$; при блоке штампа на колонках $K_t = 1{,}5$); K_{s2} — коэффициент, учитывающий материал рабочих частей (для углеродистой стали $K_{s2} = 1{,}0$; для легированной $K_{s2} = 1{,}5$); K_a — коэффициент, учитывающий механические свойства штампуемого материала (для углеродистой стали с $\sigma_в \leqslant 500$ МПа $K_a = 1{,}0$; с $\sigma_в \geqslant 500 \div 900$ МПа $K_a = 0{,}8$; с $\sigma_в \geqslant 900$ МПа $K_a = 0{,}6$; для бронзы твердой $K_a = 1{,}5$; для бронзы мягкой $K_a = 1{,}8$; для алюминия $K_a = 2{,}1$); K_s — коэффициент, учитывающий толщину штампуемого материала (для $s = (0{,}05 \div 0{,}3)$ мм $K_s = 1{,}0$; для $s = 0{,}3 \div 1{,}0$ мм $K_s = 1{,}1$; для $s = 1{,}0 \div 3{,}0$ мм $K_s = 0{,}8$; для $s = 3{,}0 \div 6{,}0$ мм $K_s = 0{,}5$); K_b — коэффициент, учитывающий сложность контура детали (для простого контура $K_b = 1{,}0$; для усложненного $K_b = 0{,}8$; для сложного $K_b = 0{,}6$).

Расчет стойкости по формуле (11) дает результаты, которые согласуются с практикой.

Для ориентировочного расчета стойкости T_0 (числа нагружений) штампа до полного изнашивания Д. А. Вайнтрауб рекомендует упрощенную эмпирическую формулу, пригодную для вырубных (напроход) и последовательных штампов при штамповке материала толщиной до 6 мм и материала рабочих частей из стали У10А:

$$T_0 = \frac{K_ф 10^6}{\sigma_в} (12 - s), \quad (12)$$

где $\sigma_в$ — предел прочности при растяжении штампуемого материала, МПа; s — толщина материала, мм; $K_ф$ — коэффициент, учитывающий сложность контура (для простого контура $K_ф = 8$; для усложненного $K_ф = 6{,}5$; для сложного $K_ф = 5$). Для пробивных и совмещенных штампов стойкость T_0 следует принимать меньше на 15—20 %.

Стойкость (тыс. нагружений) пробивных универсально-сборных штампов (УСШ) до переточки в зависимости от толщины и предела прочности штам

3. Ориентировочные данные плановой стойкости рабочих частей штампов до полного износа

Тип штампа	Толщина материала, мм	Стойкость (тыс. нагружений) в зависимости от материала рабочих частей	
		Углеродистая сталь (У10А, У11А)	Легированная сталь (Х12М, Х12Ф1)
Вырубной (с направляющими колонками)	До 0,5	800—1000	1100—1400
	1,0	600—800	800—1100
	2,0	450—600	600—850
	3,0	350—500	500—700
	5,0	300—400	400—600
Пробивной	$s/d = 0{,}3 \div 0{,}5$	120—200	300—400
	$s/d = 0{,}5 \div 0{,}7$	70—120	200—300
	$s/d = 0{,}8 \div 1{,}0$	40—80	150—200
Гибочный: простой	До 3	1000—1200	1400—1700
сложный		600—700	800—1000
Вытяжной простой		1200—1600	1800—2400
Формовочный		400—500	600—800

Примечание. Наименьшие значения стойкости относятся к штамповке более твердых материалов (стали 30, 40), а наибольшие — к штамповке более мягких материалов (стали 10, 20, Ст2).

пуемого материала можно определить по формуле [65]

$$T_{ст} = \frac{506\,000}{\sqrt[3]{s^2}\,\sigma_в \sqrt{\sigma_в}}, \qquad (13)$$

где s — толщина материала, мм; $\sigma_в$ — предел прочности, МПа.

Стойкость (тыс. нагружений) обычных пробивных штампов до переточки, монтируемых на постоянных блоках с направляющими колонками, рекомендуется рассчитывать по формуле

$$T_{ст.\,пр} = \frac{680\,000}{\sqrt[3]{s^2}\,\sigma_в \sqrt{\sigma_в}}. \qquad (14)$$

Расчетные формулы (13) и (14) получены при следующих производственно-технологических условиях: штампуемый материал — стали Ст3, Ст4, 12Х18Н9Т ($\sigma_в = 400 \div 600$ МПа); толщина материала $s = 4 \div 10$ мм, $s/d = 0{,}3 \div 0{,}5$; двусторонний зазор $z = 12 \div 18$ % от s; материал пуансона и матрицы — сталь Х12М, термически обработанная до *HRC* 56—62; критерий износа — образование заусенца высотой 0,2 мм.

Стойкость пробивных универсально-сборных штампов с рабочими частями из сталей У8А—У10А составляет от 40 до 60 % указанной выше стойкости.

Стойкость (тыс. нагружений) вырубных штампов до переточки выше

стойкости пробивных штампов на 30—40 %, что объясняется уменьшением удельных нагрузок на режущие кромки;

$$T_{ст.\,выр} \approx \frac{948\,600}{\sqrt[3]{s^2}\,\sigma_в \sqrt{\sigma_в}}. \qquad (15)$$

Учесть всю совокупность конструктивно-технологических факторов, влияющих на стойкость разделительных штампов, расчетным путем не всегда представляется возможным. Поэтому на практике, в зависимости от характера и условий производства, в различных отраслях промышленности используют опытно-статистические данные, на основании которых получены нормы стойкости как до переточки, так и до полного изнашивания.

В табл. 3 приведены ориентировочные данные плановой стойкости рабочих частей штампов до полного изнашивания для листовой стали средней твердости, исходя из условия, что разделительные штампы подвергают в среднем 20—25 переточкам. Следует иметь в виду, что в различных отраслях промышленности наблюдаются значительные отклонения от средних норм стойкости.

С целью повышения стойкости штампов применяют разъемные (секционные) матрицы, позволяющие производить доводку их размеров до заданных по чертежу профильным шлифованием. При этом значительно сокращается трудоемкость изготовления комплекта рабочих частей штампа, улучшается качество их обработки, обеспечивается равномерное распределение технологического зазора.

Удельный износ пуансон-матрицы по режущему контуру в целом при штамповке пластинки ярма в штампе совмещенного действия с разъемной матрицей (рис. 4) примерно в 2 раза меньше, а стойкость штампа в 2 раза больше по сравнению с неразъемной.

Стойкость вырубных штампов до полного изнашивания с составной (секционной) пуансон-матрицей по сравнению с цельной матрицей более чем в 4 раза выше (рис. 5).

Стойкостные испытания разделительных штампов являются весьма трудоемкими, требуют больших затрат

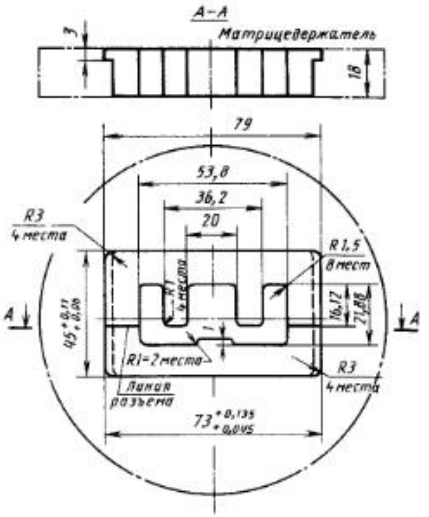


Рис. 4. Конструкция разъемной матрицы для штампа совмещенного действия

времени, значительных материальных затрат на изготовление инструмента, а также на материалы для проведения экспериментов. Поэтому при проведении стойкостных испытаний весьма актуальным является применение математической теории планирования экспериментов.

Применение теории планирования многофакторного эксперимента при

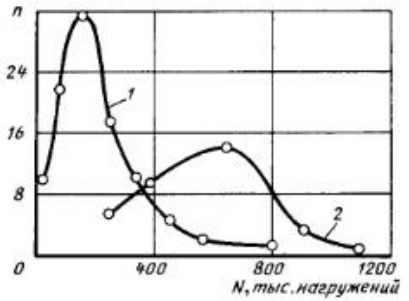


Рис. 5. Сравнительная характеристика полной стойкости штампов с цельной и составной (секционной) пуансон-матрицей для вырубки пластины статора электродвигателя (n — число штампов):

1 — штамп для вырубки статора электродвигателя с цельной пуансон-матрицей; *2* — тот же штамп с составной (секционной) пуансон-матрицей

4. Применение твердых сплавов в электротехнической промышленности и стойкость штампов между переточками (тыс. нагружений)

Тип штампов и их назначение	Штампуемый материал	Штампы средних габаритов		Крупногабаритные штампы		Средняя стойкость штампов	
		матрица	пуансон	матрица	пуансон	стальных	твердосплавных
Ножевые	Электротехническая сталь толщиной 0,5 мм	ВК8В	ВК8В	ВК15	ВК15	30	3000
Пробивные и вырубные для прямоугольных пластин	То же Сталь 45 толщиной 4 мм	ВК15 ВК20	ВК15 ВК25	— —	— —	25 20	1500 1000
Вырубные сложной формы для листов статора, роторов, пластин трансформаторов	Электротехническая сталь толщиной до 0,5 мм	ВК15	ВК20	ВК20	ВК25	10	500

расчете стойкости разделительных штампов, предназначенных для штамповки деталей из слоистых пластмасс (гетинакс, текстолит и др.), рассмотрено в гл. 16.

Стойкость твердосплавных штампов. Существенное повышение стойкости разделительных и формообразующих штампов достигается при использовании твердых сплавов.

Сравнительно небольшие разделительные и формообразующие (вытяжные, калибровочные, гибочные и др.) штампы оснащают вставками из спекаемых (порошковых) твердых сплавов. Наибольшее применение для изготовления твердосплавных вставок получили сплавы ВК15 и ВК20, обеспечивающие существенное повышение стойкости разделительных штампов.

Штампы с твердосплавными вставками применяют, как правило, в массовом производстве при штамповке небольших деталей из труднообрабатываемых сталей (высококремнистой электротехнической, коррозионностойкой и др.).

Стойкость вырубных штампов с твердосплавными рабочими частями в десятки раз выше стойкости стальных штампов и достигает 0,5—1,0 млн. нагружений до переточки (табл. 4) при общей стойкости 20—60 млн. нагружений.

Стоимость твердосплавных разделительных штампов во много раз превышает стоимость стальных штампов вследствие высокой трудоемкости изготовления и доводки рабочих частей из твердых сплавов до исполнительных размеров. Эксплуатация твердосплавных штампов требует высокой организации производства.

5. Работоспособность сплавов при вырубке пазов (в штампах «пазинках») из электротехнической стали [28]

Сплав	Стойкость между переточками (число нагружений)			Средний износ пуансона, мм
	минимальная	максимальная	средняя	
ВК10КС	151 266	273 600	240 000	1,05
ВК15КС	387 943	557 280	455 000	0,63
ВК20КС	—	—	555 000	1,10
ВК15С	869 280	1 120 600	990 000	0,48
ВК20	423 225	454 275	455 000	0,70

Примечание. Стойкость в числе нагружений оценивалась как средняя величина из четырех—восьми переточек на двух штампах.

При изготовлении штампов с твердосплавными рабочими частями применяют массивные блоки с плавающими хвостовиками, четырьмя направляющими колонками и удлиненными втулками.

Весьма эффективным является применение титанокарбидного твердого сплава на железной основе, получившего название «Ferro-TiC» (США). Основой этого сплава (композита) является хромомолибденовая сталь с присадкой 30 % карбида титана. Этот сплав подвергается термической обработке до твердости *HRC* 68—72 и вполне заменяет вольфрамокобальтовые сплавы ВК15, ВК20.

Штампы с режущими частями, изготовленными из «Ferro-TiC», обладают высокой стойкостью, так как при штамповке листов магнитопроводов электродвигателей из кремнистой стали они обеспечивают получение 300 тыс. нагружений до переточки, а при штамповке деталей из низкоуглеродистой стали до 2 млн. нагружений.

Опыт использования твердосплавных разделительных штампов показал, что их применение рационально при годовой программе штампуемых на них деталей не менее 1 млн. нагружений.

При проектировании твердосплавных штампов для разделительных операций оснащению твердыми сплавами подлежат в первую очередь рабочие части (матрицы, пуансон-матрицы, пуансоны и ножи). В отдельных случаях ими оснащаются направляющие планки, направляющие узлы скольжения и иногда, в особо ответственных и точных штампах, окна съемников. При этом руководствуются тремя основными условиями: созданием достаточно прочной и надежной конструкции, сведением до минимума расхода твердого сплава и доступностью обработки твердосплавных деталей на станках.

Общие требования, предъявляемые к конструкции твердосплавных штампов для обеспечения их нормальной работоспособности, приведены в работе [34]. Для пуансонов, пуансон-матриц и матриц обычно применяют твердый сплав ВК20. Матрицы могут быть также изготовлены из сплава ВК15. Вспомогательные детали, работающие на истирание, рекомендуется изготовлять из сплава ВК8.

В работе [28] исследована стойкость WC—Co-твердых сплавов серий С и КС при вырубке пазов на листах из электротехнической стали 1211 ротора электродвигателей АК-5 и $АоК_2$-5/4 на полуавтоматах завода «Вольта». Результаты стойкостных испытаний приведены в табл. 5.

На рис. 6 в виде диаграммы приведены механические (прочностные и

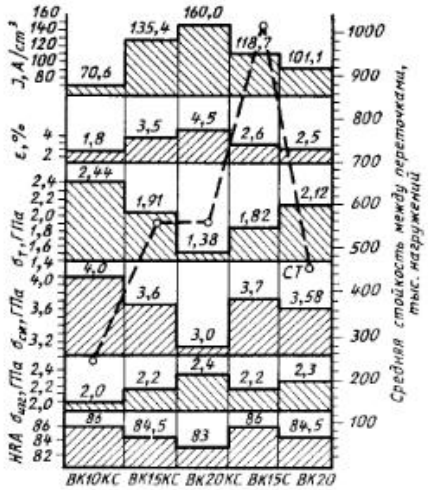


Рис. 6. Основные механические свойства и средняя стойкость между переточками твердых сплавов при вырубке пазов в листах электродвигателей

пластические) свойства испытанных сплавов в сопоставлении со средней стойкостью между переточками.

Из приведенных на рис. 6 данных видно, что из исследованной серии сплавов наиболее износостойким является сплав ВК15С, который имеет оптимальное сочетание свойств, характеризуется высокими пластическими и прочностными свойствами в сочетании с повышенной твердостью. В сравнении со сплавом ВК20 стойкость рабочих частей штампа из сплава ВК15С до переточки при штамповке электротехнической стали в 1,6—2 раза больше, а износ в 1,4 раза меньше.

Резервом повышения стойкости твердосплавных вырубных штампов в листоштамповочном производстве является упрочнение твердых сплавов термической обработкой. Процесс упрочнения порошковых твердых сплавов существенно улучшает их служебные характеристики. Упрочнение твердых сплавов по оптимальным режимам позволяет в значительной степени повысить их прочностные и деформационные характеристики: предел прочности при изгибе и ударную вязкость до 30 %, работу пластической деформации до 40 %, стойкость при ударном и гармоническом нагружении в 2—6 раз.

Производственными испытаниями установлено (табл. 6), что стойкость штампов с упрочненными термической обработкой твердосплавными рабочими элементами (сплав ВК15) при вырубке П- и Т-образных пластин из электротехнической стали марки 3414 в 1,3—1,4 раза выше стойкости штампов контрольной серии (без термической обработки).

Технико-экономическая эффективность применения твердосплавных штампов. Основным показателем экономической эффективности твердосплавных штампов является снижение удельных затрат на штамповую оснастку, необходимую для выполнения годовой программы выпуска. Экономическую эффективность $Э$ (условную годовую экономию) применения твердосплавных штампов при неизменном технологическом процессе подсчитывают по формуле

$$Э = \frac{K}{П_с}(C + CИ) - \frac{K}{П_т}(C_т + C_т И), \quad (16)$$

где K — годовая программа выпуска штампуемых деталей, шт.; $П_с$ — полная стойкость (среднее значение) штампа со стальными рабочими частями, число нагружений; $П_т$ — полная стойкость твердосплавного штампа, число нагружений; C — стоимость одного штампа со стальными рабочими частями, руб.; $C_т$ — стоимость одного твердосплавного штампа, руб.; $И$ — издержки производства на содержание и ремонт одного штампа, приближенно равные 15 % стоимости изготовления штампа.

Полную стойкость $П_т$ твердосплавного штампа определяют по формуле

$$П_т = Пn, \quad (17)$$

где $П$ — стойкость твердосплавного штампа между переточками, число нагружений; n — число переточек или ремонтов. Число допускаемых переточек твердосплавных штампов равно 15—25.

6. Результаты стойкостных испытаний вырубных штампов до полного изнашивания

В исходном состоянии		После термической обработки	
Число нагружений, млн.	Причина выхода штампа из строя	Число нагружений, млн.	Причина выхода штампа из строя
2,6/13	Выкрашивание кромок	3,6/12	Притупление кромок
2,0/10	То же	3,2/17	То же
2,8/15	Притупление кромок	2,8/10	Выкрашивание кромок
2,5/15	Выкрашивание кромок	4,0/16	Притупление кромок
2,6/14	То же	3,5/13	То же
2,3/12	»	3,1/13	»
2,8/16	Притупление кромок	3,6/15	»
2,5/14	Выкрашивание кромок	3,0/13	Выкрашивание кромок
2,4/15	Скол кромки	3,6/10	Притупление кромок
2,6/15	Притупление кромок	3,2/13	То же

Примечание. В знаменателе приведено число переточек штампа до полного выхода из строя.

Стоимость $C_т$ твердосплавного штампа определяют по формуле

$$C_т = (3 \div 5)\, C, \quad (18)$$

где C — стоимость стального штампа, руб.; $3 \div 5$ — коэффициент, зависящий от технического уровня технологии изготовления твердосплавных штампов.

Экономическая эффективность от эксплуатации твердосплавных штампов дополнительно повышается за счет повышения производительности прессов-автоматов и улучшения качества штампуемых деталей.

Способы повышения стойкости стальных разделительных штампов. *Применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).* Физико-химические свойства СОТС для разделительных операций листовой штамповки, в том числе и для чистовой вырубки—пробивки, приведены в табл. 7.

Удаление СОТС с деталей может проводиться бензином, горячими водными растворами щелочных солей и моющих средств. Приведенные СОТС представляют собой средневязкое минеральное масло с активными серохлорсодержащими присадками. Нанесение смазок на обрабатываемый металл возможно механизированным способом, например, посредством смазывающих валиков, а также вручную кистью.

Результаты испытаний СОТС, приведенных в табл. 7, подробно изложены в гл. 18.

Увеличение высоты рабочих поясков и уменьшение уклона профиля рабочих окон матриц. Стойкость штампа до переточки существенно зависит от исходного технологического зазора $z_и$ и уклона α профиля рабочего окна матрицы (рис. 7) Так, например, при росте $z_и$ с 2 до 22 % от s и уменьшении α от 30′ до 3′ стойкость штампа до переточки возрастает в 9 раз.

Критерием полного износа штампа был принят выход размеров штампуемых деталей за поле допуска вследствие повышенной неравномерности сколов при выработке перетачиваемого профиля матриц.

Наибольшая полная стойкость штампа (рис. 8) получена при вырубке деталей на матрицах с параметрами: $h = 28$ мм; $\alpha = 0° 3'$; $z_и = 22$ % от s, т. е. с увеличенной в 2—3 раза высо-

7. Физико-механические свойства некоторых СОТС

Параметр	ХС-141	ХС-163	ХС-164
Кинематическая вязкость при 50 °С, мм²/с	40—55	40—60	75—90
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не менее	150	150	170
Кислотное число, мг КОН, не более	3	3	3
Содержание, %:			
серы	1—2	1—3	1—2
хлора	17—21	17—21	17—21
воды	0,03	0,03	0,03
Нагрузка, Н, не менее:			
критическая	1000	1000	1000
сваривания	500	500	500
Обобщенный показатель износа	96	97	100

Примечание. Выдерживают 100 ч при 20+5 °С.

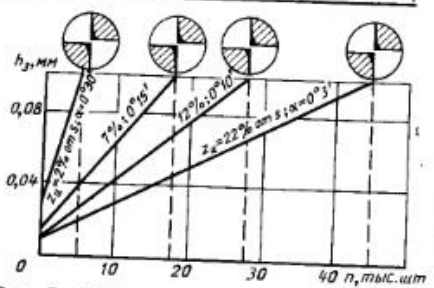


Рис. 7. Изменение высоты $h_з$ заусенца в зависимости от числа вырубленных деталей из электротехнической стали до переточки штампа при различных значениях технологического зазора z и уклона α профиля рабочего окна матрицы. Схемы износа режущих кромок пуансона и матрицы

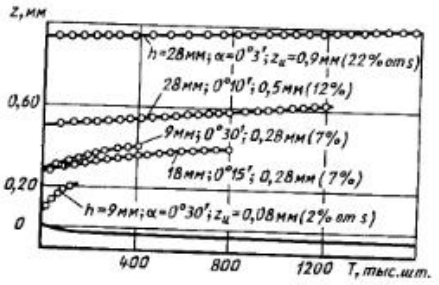


Рис. 8. Изменение технологического зазора z в зависимости от полной стойкости штампа при различных параметрах матрицы (периодичность переточек обозначена кружками):

h — высота перетачиваемого профиля рабочего окна матрицы; $z_н$ — исходный двусторонний зазор между матрицей и пуансоном; сплошная линия — усредненная кривая бокового износа пуансона

той перетачиваемого профиля, уменьшенным в 2—3 раза уклоном рабочих окон матриц и с оптимальным зазором. При увеличении $z_н$ с 2 до 7 % от s полная стойкость штампа повышается в 4 раза (см. рис. 8). Полная стойкость матриц по сравнению со стойкостью матриц, выполненных по РТМ 34—65, увеличилась в 3 раза.

Эффект повышения стойкости в 3—4 раза достигается при использовании секционных матриц. Достоинством таких матриц является возможность выполнения в них уклонов с точностью ±0° 2′ и экономичность изготовления.

Для выбора параметров рабочего профиля матриц при массовом производстве необходимо дальнейшее дифференцирование условий разделения материала на частные случаи, обеспечивающие наибольшую стойкость штампов. Выбор этих параметров рекомендуется проводить в зависимости от вида штампуемого материала, выполняемых технологических операций, начальных зазоров между рабочими частями и т. д.

Применение пуансонов с рифленой рабочей поверхностью. Усовершенствованный способ пробивки отверстий и вырубки асимметричных деталей из толстолистового металла пуансонами с рифленой рабочей поверхностью разработан С. З. Юдовичем и И. И. Горбенко и внедрен в производство со значительным эффектом. Предусмотрено предпочтительное применение шага рифлений $l = 0{,}4$; 0,5; 0,6 мм при угле профиля 70° (рис. 9). Установлено, что при пробивке отверстий диаметром 9,1 мм в листовой стали Ст3пс (при $s = 3$ мм) усилие пробивки, а следовательно, и сопротивление разделению (сдвигу) $\sigma_{сд}$ существенно зависят от состояния рабочей поверхности пуансонов, характеризуемого шагом рифлений l.

Изменение усилий пробивки и высоты блестящего пояска в зависимости от состояния рабочей поверхности пробивных пуансонов приводит к изменению числовых значений общей работы разделения и ее составляющих частей. Общая работа разделения при пробивке пуансоном с рифленой рабочей поверхностью ($l = 0{,}4$ мм) в среднем на 20 % ниже, чем при пробивке шлифованными пуансонами.

На деталях, вырубленных рифленым пуансоном, ярко выраженной границы между пояском смятия и остальной поверхностью нет. Это указывает на существенное снижение удельных нагрузок в зоне контактного пояска при вырубке рифленым пуансоном, а следовательно, и на снижение силовых и энергетических затрат на разделение штампуемого материала.

Применение рифленых вырубных и пробивных пуансонов обеспечивает повышение их износостойкости в 3—4 раза. При этом улучшается качество получаемых деталей за счет сохранения стабильности размеров разделительного инструмента и, как следствие, снижается возможность образования заусенца, устраняется налипание штампуемого металла на рабочих поверхностях пуансонов, снижается упрочнение металла как в зоне разделения, так и по контактным пояскам, возрастает эффективность использования СОТС.

Электроэрозионное легирование. Электроэрозионное легирование с применением установок моделей ЭФИ-46А, ЭФИ-78, ЭФИ-23М позволяет формировать на рабочих поверхностях пуансонов и матриц рельеф, состоящий из совокупности выступов, близких по форме к шаровым сегментам, хорошо

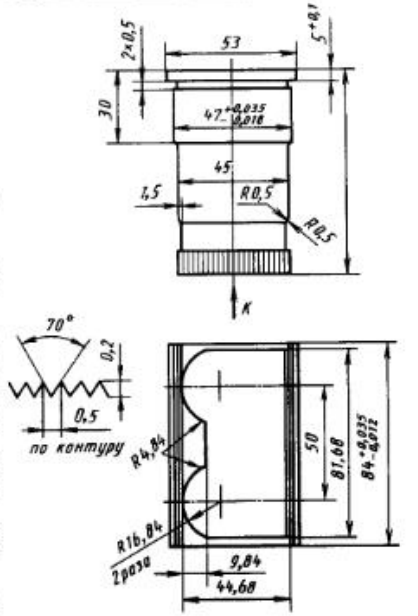


Рис. 9. Пуансон с рифленой рабочей поверхностью для вырубки проушины

противостоящих разрушению при интенсивном течении обрабатываемого металла. Выступы имеют следующие размеры: отношение высоты к радиусу $H/R = 0{,}04 \div 0{,}20$; шаг между выступами $l = 0{,}05 \div 2{,}5$ мм.

После электроискрового легирования в значительной мере снижается изнашивание поверхностного слоя рабочих частей штампов.

Наиболее распространенными электродными материалами для выполнения электроэрозионного легирования являются твердые сплавы группы ТК и ВК, а также графиты марок МПГ-6, МПГ-7, МПГ-8 и ЭЭПГ.

На рис. 10, *а* и *б* приведены примеры рабочих частей разделительных штампов с указанием зон, подвергаемых электроэрозионному легированию.

Удельное время $t_{уд}$ легирования зависит от энергии импульсов $E_{имп}$ (рис. 11). С увеличением энергии импульсов возрастает производительность легирования, но при этом увеличиваются и размеры формируемых выступов. Легирование рабочих частей

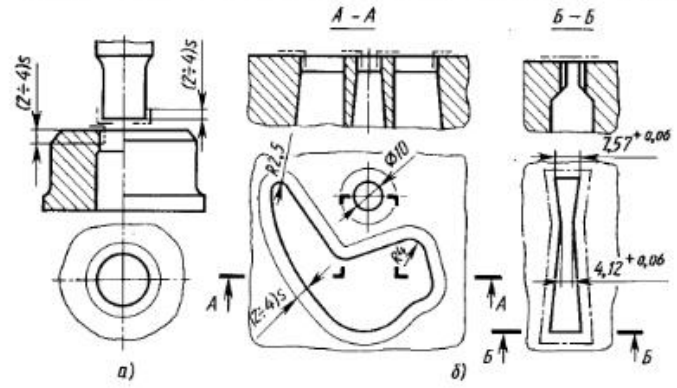


Рис. 10. Примеры пуансонов и матриц вырубных штампов, подвергаемых электроэрозионному легированию

вырубных штампов из сталей Х12, У8 твердым сплавом Т15К6 на установке ЭФИ-46А повышает стойкость штампов в 4—6 раз при вырубке деталей из электротехнической стали толщиной 0,5 и 1 мм, стали 08кп толщиной 3 и 5 мм.

Установлено, что твердость поверхности образцов, легированных твердым сплавом Т15К6 электроэрозионным методом на установке ЭФИ-46А на мягких режимах из расчета 4 мин на 1 см² поверхности, составляла HV 1600—1800, тогда как твердость закаленной мартенситной структуры на рабочей поверхности деталей штампов из сталей Х12М и Х6Ф4М не превышает HV 761—811. Для повышения эффективности электроэрозионного легирования твердым сплавом рекомендуется сошлифовать с поверхности детали слой толщиной не более 0,005—0,01 мм и довести шероховатость поверхности упрочненного слоя до $Ra \leqslant 0{,}63$ мкм.

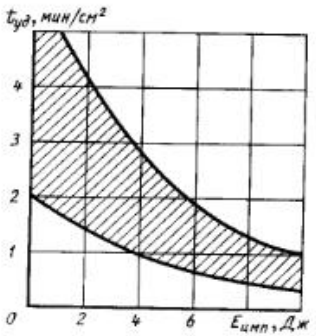


Рис. 11. Зависимость удельного времени легирования от энергии импульсов

Штампы для вырубки листов магнитопроводов электродвигателей 4А-71, 4А-80 и 4А-90 с упрочненными режущими кромками (элементами) на прессах PASL-160/2 и PP-250 показали повышение стойкости в 1,5—3 раза.

Внедрение электроискрового легирования пуансонов и матриц штампов для пробивки отверстий в изделиях из стали 65Г в горячем состоянии на полуавтоматической линии позволило увеличить стойкость пуансонов из стали 5ХНТ в 4 раза.

Наиболее высокую стойкость имели пуансоны после электроискрового легирования сплавом ВК8 на установке ЭФИ-46А с предварительной обработкой рабочих поверхностей графитовым электродом марки ЭГ-4.

Поверхностное пластическое деформирование. Сущность метода поверхностного пластического деформирования (ППД) состоит в том, что под давлением движущегося деформирующего элемента (ролика, шарика, выглаживателя и др.) металл выступов неровностей и тонкого поверхностного слоя в месте контакта с деформирующим элементом, находясь в условиях объемного напряженного состояния, пластически деформируется и перемещается, затекая в смежные впадины и выдавливаясь из них вверх. В результате образуется качественно новая поверхность с неровностями специфической формы, которую нельзя получить при лезвийных и абразивных способах обработки.

Вновь образованный микрорельеф упрочненной поверхности характеризуется следующими параметрами: большим отношением шага неровностей к их высоте; высокой степенью однородности неровностей как по форме, так и по высоте; малыми углами наклона; большими радиусами скругления вершин выступов и дна впадин, что определяет пологую обтекаемую форму неровностей.

Специфический микрорельеф в сочетании с высокой микротвердостью тонкого поверхностного слоя и высокими остаточными напряжениями сжатия (до 1000 МПа) обеспечивает существенное повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей.

По данным В. А. Пышкина, в результате комплексного упрочнения матрицы и нижней плиты вырубного штампа, предназначенного для штамповки гаек толщиной 6 мм из стали Ст3, его стойкость повысилась в 2,6 раза (с 8000 до 22 000 вырубленных деталей).

Упрочнение готовой поверхности матрицы в зоне контактного пояска проводили обкаткой шариком, а ее рабочего отверстия — дорнованием напроход с натягом 0,15—0,20 мм.

Как известно алмазное выглаживание улучшает поверхностный слой. Исследовано влияние алмазного выглаживания боковой рабочей поверхности пуансонов из стали У8А, термообработанных до HRC 52—56 и шлифованных, на их стойкость. Шероховатость поверхности рабочей части $Ra = 1{,}2 \div 0{,}8$ мкм. Исходная величина технологического зазора между матрицей и пуансоном составляла $z_1 = 5\,\%$ и $z_2 = 7{,}5\,\%$.

Результаты производственных стойкостных испытаний шлифованных и выглаженных пуансонов при пробивке отверстий диаметром 5,4 мм в детали из стали Ст3 толщиной 2 мм на кривошипном прессе усилием 1000 кН приведены на рис. 12. На рисунке видно,

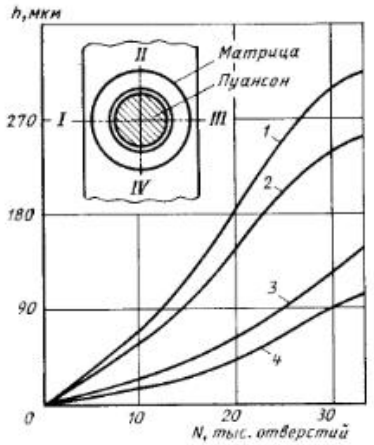


Рис. 12. Изменение линейного износа h пуансона в зависимости от числа N пробитых отверстий диаметром 5,4 мм в детали из стали Ст3 (s = 2 мм):

1 — шлифованный пуансон (сечение *II—IV*); *2* — шлифованный пуансон (сечение *I—III*); *3* и *4* — выглаженные пуансоны (сечения *II—IV* и *I—III* соответственно)

что после пробивки 40 тыс. отверстий износ выглаженных пуансонов примерно в 2,5 раза меньше, чем шлифованных. Повышение износостойкости выглаженных пуансонов объясняется упрочнением металла в тонких поверхностных слоях, улучшением условий смазывания и теплоотвода из зоны пластической деформации.

Обработка электроэрозионным методом. Нормативное значение шероховатости рабочих поверхностей разделительных штампов, изготовляемых традиционным слесарно-механическим способом, составляет $Ra = 0{,}16 \div 0{,}63$ мкм. При такой шероховатости поверхность имеет направленное расположение неровностей, плохо удерживающих смазочный материал, и примерно одинаковые физико-механические свойства поверхностных и приповерхностных слоев металла.

При электроэрозионной обработке разделительных штампов параметры шероховатости составляют от $Ra = 6{,}3$ мкм на черновых режимах (энергия импульса 0,08 Дж) до $Ra = 1{,}2 \div 2$ мкм на чистовых (энергия импульса 0,002 Дж). При этом глу-

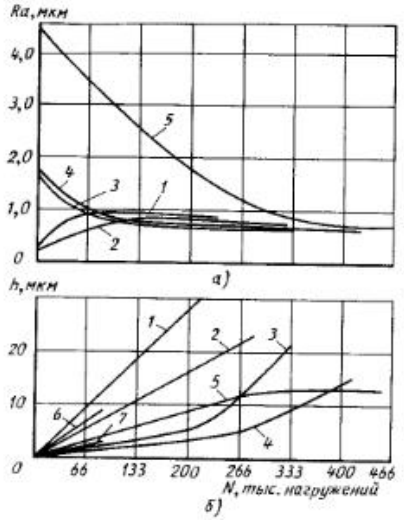


Рис. 13. Зависимость шероховатости *Ra* (*а*) и линейного износа *h* (*б*) от числа циклов *N* нагружений для сталей:
1 — У8; *2* — Х12М после слесарно-механической обработки; *3* — У8А; *4* — Х12М после электроэрозионной обработки с энергией импульса 0,003 Дж; *5* — Х12М после электроэрозионной обработки с энергией импульса 0,014 Дж; *6* — У8А после слесарно-механической обработки при эксплуатации в реальных условиях; *7* — Х12М после электроэрозионной обработки с энергией импульса 0,008 Дж при эксплуатации в реальных условиях

бина зоны термического влияния составляет от 0,15 мм на черновых режимах до 0,01 мм на чистовых.

При электроэрозионной обработке разделительных штампов образуется характерная лунчатая поверхность с ненаправленно расположенными неровностями, хорошо удерживающими смазочный материал, и различными физико-химическими свойствами поверхностных и приповерхностных слоев материала.

В настоящее время при изготовлении разделительных штампов поверхности, полученные после обработки электроэрозионным методом, доводят до норм на шероховатость поверхностей, полученных традиционным способом. При этом удаляется специфический поверхностный слой, образованный при электроэрозионной обработке, существенно повышается трудоемкость изготовления рабочих деталей штампа и удлиняются сроки технологической подготовки производства. Это нерационально, так как при этом не используются все возможности электроэрозионного метода, ибо поверхности, полученные после электроэрозионной обработки, обладают повышенной эксплуатационной стойкостью.

В процессе нагружения рабочих частей штампа поверхности трения независимо от первоначальной шероховатости приходят к одной шероховатости, присущей данным условиям трения (рис. 13). В дальнейшем с увеличением числа циклов нагружения шероховатость этой поверхности не изменяется. Происходит как бы саморегулирование шероховатости поверхности. Если поверхности не подвергались электроэрозионной обработке, то линейный износ (рис. 13, *б*) образцов из стали У8 примерно в 2 раза выше, чем образцов из стали Х12М. После электроэрозионной обработки линейный износ уменьшается в 3—5 раз и значительно уменьшается разница в износе различных сталей. Увеличение энергии разряда при электроэрозионной обработке увеличивает глубину измененного слоя и число циклов нагружения, после которых начинается изнашивание, характерное для данного материала. Экспериментальные данные стойкости вырубных штампов подтверждают результаты исследований на моделях (образцах).

Для электроэрозионной обработки вырубных штампов большое значение имеет тот факт, что рабочие поверхности вырубного штампа независимо от первоначальной шероховатости в процессе взаимодействия с вырубаемым материалом приходят к одной шероховатости, характерной для данных условий трения. Это позволяет изготовлять вырубные штампы с большей шероховатостью поверхности, чем та, которая устанавливается в процессе трения, что экономически более целесообразно, вследствие существенного снижения трудоемкости изготовления рабочих частей штампа при применении более производительных режимов обработки и исключении дорогостоящих доводочных работ.

Сохранение на рабочих деталях штампа поверхностного слоя, полученного электроэрозионной обработкой, имеющего более благоприятные физико-химические свойства и специфические форму и расположение неровностей, позволяет в 3—5 раз повысить его стойкость.

Поверхностное упрочнение режущих кромок с помощью лазера. К числу новых перспективных способов поверхностного упрочнения материалов следует отнести термическую обработку с помощью оптических квантовых генераторов (лазеров). Для термической обработки рекомендуется применение газовых лазеров мощностью 1—5 кВт. При лазерной обработке в большом диапазоне скоростей перемещения луча на поверхности образцов достигается температура, достаточная для перекристаллизации.

Процесс лазерного упрочнения имеет ряд особенностей, выгодно отличающих его от других методов упрочнения: получение на поверхности материала слоя с заданными свойствами путем введения легирующих элементов; локальность процесса упрочнения; применение в качестве финишной операции, так как коробление при лазерной обработке отсутствует; получение заданной шероховатости поверхности; повышение коррозионной стойкости поверхностных слоев; автоматизация процесса обработки; высокая культура производства.

На рис. 14 приведен график, иллюстрирующий изменение глубины упрочненного слоя от плотности мощности лазерного излучения для некоторых инструментальных сталей, применяемых для изготовления рабочих деталей разделительных штампов. Максимально достижимая глубина упрочненного слоя составляет 100—150 мкм.

В целях повышения стойкости разделительных штампов упрочнению подвергают режущие кромки как пуансонов, так и сопрягаемых с ними режущих кромок матриц. Упрочнение режущих кромок матриц осуществляется с использованием линейной схемы упрочнения, когда зоны воздействия лазерных импульсов, следующих последовательно друг за другом, располагаются с определенным перекрытием

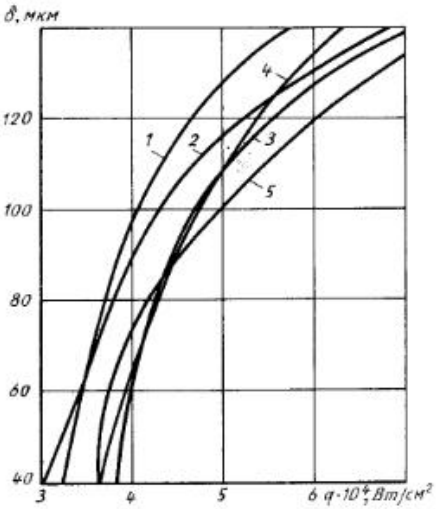


Рис. 14. Зависимость глубины упрочненного слоя инструментальных сталей от плотности мощности лазерного излучения:
1 — У8; *2* — 9ХС; *3* — ХВГ; *4* — ШХ15; *5* — Х12М

в один ряд вдоль рабочей кромки.

Производственные испытания комбинированных упрочненных штампов (пуансоны из стали У8А, матрицы из стали Х12М) с глубиной и микротвердостью упрочненного поверхностного слоя соответственно 120 мкм и 12 000 МПа, предназначенных для штамповки высококремнистой электротехнической стали, показали повышение стойкости между переточками в 5—7 раз (100—140 тыс. нагружений вместо 20 тыс. на штампах без упрочнения).

При штамповке на быстроходных прессах применение лазерного упрочнения обеспечивает повышение стойкости штампов в 2—3 раза.

Облучение режущих кромок серийных вырубных штампов из стали У10 (закаленной и отпущенной до *HRC* 59 на установке «Квант-16») увеличило микротвердость *HV* с 630 до 1200—1350, а стойкость инструмента до первой переточки возросла с 4,5—5 тыс. до 10—14 тыс. нагружений.

Оптимальные режимы упрочнения режущих кромок вырубных штампов

с помощью лазера исследованы, исходя из условий получения максимальной глубины упрочненных слоев, определяющих стойкостные характеристики упрочненной штамповой оснастки. Исследование проводили на образцах из сталей У8, У10, 9ХС, ХВГ, ШХ15, Х12, Х12М, Х12Ф1. Упрочнение образцов выполнялось на установке «Квант-16».

В результате исследования установлено, что упрочнение без чернения обрабатываемых поверхностей характеризуется большим (до 50 %) разбросом глубины упрочненных слоев; при упрочнении поверхностей, подвергнутых чернению, глубина упрочненных слоев при равных плотностях излучения возрастает на 20—30 %, а разброс глубины слоев не превышает 20 %; твердость упрочненного слоя (при отсутствии оплавления поверхности) практически не зависит от плотности излучения и составляет для исследуемых марок сталей HV 800—1100.

Сравнительные производственные испытания при вырубке деталей из латуней, бериллиевой бронзы, алюминиевых сплавов, низкоуглеродистой стали, текстолита и других материалов показали, что стойкость вырубных штампов, упрочненных лазерным излучением, повышается более чем в 2 раза. Число упрочнений, которым подвергаются разделительные штампы за период их эксплуатации, определяется числом их переточек.

Стойкость вытяжных и гибочных штампов. Изнашивание штампа при вытяжке проявляется в виде царапин, рисок и углублений на рабочих поверхностях матрицы и прижимного кольца вследствие налипания (приваривания) к ним мелких частиц штампуемого металла. Кроме этого, происходит постепенное изменение размеров рабочих частей штампа под действием внешнего трения при значительных давлениях ($p = 100 \div 200$ МПа) — увеличение рабочих размеров матрицы и уменьшение размеров пуансона. Размерный износ матрицы в несколько раз больше размерного износа пуансона.

При вытяжке с утонением (при $p = 500 \div 800$ МПа) износ рабочих частей штампа протекает значительно интенсивнее.

Основными конструктивными факторами, оказывающими влияние на условия работы вытяжных штампов, а следовательно, и на их стойкость, является величина закругления рабочих кромок матриц и пуансонов, профиль этих рабочих частей и величина зазоров между матрицей и пуансоном.

Большое влияние на стойкость вытяжного штампа оказывает шероховатость рабочих поверхностей штампа. С целью повышения стойкости вытяжные матрицы подвергают полированию с доведением шероховатости их рабочих поверхностей до $Ra = 0{,}16 \div 0{,}08$ мкм.

На стойкость вытяжных матриц в большой мере влияет направление штрихов (рисок) после шлифования. Риски на стенках рабочего отверстия матрицы после обычного кругового шлифования способствуют ее изнашиванию.

Шлифование и полирование вытяжных матриц с помощью гибкой абразивной ленты, движущейся в вертикальном направлении, обеспечивают продольное расположение штрихов, что повышает стойкость вытяжных штампов на 30—40 %.

Повышение промежуточной стойкости штампов имеет практическое значение не только для разделительных, но и для вытяжных и гибочных операций, так как во многих случаях царапины и задиры появляются после 200—500 нагружений штампа, вследствие чего требуется остановка пресса и зачистка рабочих частей штампа.

Полное изнашивание рабочих частей вытяжных и гибочных штампов обусловливается изменением зазора между матрицей и пуансоном за пределы допустимого либо сильным искажением радиуса закругления рабочих кромок штампа.

Стойкость этих штампов до замены рабочих частей можно определить по формуле

$$T'_1 = \left(\frac{D_1 - D_0}{2s'} + 1 \right) T'K, \quad (19)$$

а до полного износа штампа T'_2 по выражению

$$T'_2 = T'_1 (n + 1). \quad (20)$$

В этих формулах D_1 — максимально допустимый внутренний размер (диаметр) гибочной или вытяжной матрицы; D_0 — начальный размер (диаметр) матрицы; s' — толщина слоя (по радиусу), снимаемого при каждом исправлении матрицы; T' — стойкость штампа до исправления; n — возможное число замен матрицы; K — коэффициент, учитывающий снижение стойкости (примерно на 10—15 %) после каждого исправления.

Для повышения износостойкости и предотвращения царапин и задиров при глубокой вытяжке применяют следующие материалы для изготовления рабочих частей вытяжных штампов:

для крупных вытяжных штампов — специальные хромоникелевые чугуны;

для вытяжных штампов средних размеров, а также для гибочных, формовочных и других штампов — графитизированную сталь марок ЭИ293 и ЭИ396. Графитовые включения, образующиеся в процессе отжига этой стали, повышают ее антифрикционные свойства и износостойкость;

для мелких вытяжных матриц — твердые сплавы ВК8 и ВК15, обладающие большой износостойкостью (в десятки раз выше, чем углеродистая сталь) и невосприимчивостью к налипанию частиц металла.

Способы повышения стойкости штампов за счет применения износостойких покрытий. К рабочим деталям разделительных штампов, а также штампов для холодной объемной штамповки предъявляются высокие требования как к их объемным свойствам (высокая прочность, ударная вязкость, усталостные характеристики и т. п.), так и к поверхностным) (высокая износостойкость, низкая способность к схватыванию, высокие антифрикционные свойства и т. п.).

Весьма перспективным способом удовлетворения противоречивых требований к штамповым материалам является создание на деталях и инструментах штампов износостойких поверхностных слоев (покрытий), обладающих необходимым для работы в условиях трения комплексом триботехнических свойств.

Новые прецизионные методы нанесения покрытий основаны на конденсации частиц, имеющих высокую энергию, на поверхности детали.

Одним из основных требований, предъявляемых к покрытиям, является высокая адгезия наносимого материала к основе. Наиболее прочным будет соединение, полученное при образовании химической связи.

К традиционным способам повышения износостойкости относятся: азотирование, хромирование, силицирование. К новым — борирование, ванадирование, покрытие карбидом титана, покрытие нитридом титана.

Азотирование — это диффузионный процесс, его широкое распространение объясняется относительно невысокой стоимостью азотирования и тем, что весь процесс протекает при одной температуре (500—600 °С), при которой коробление деталей незначительно. Другим преимуществом азотирования является возможность его осуществления в условиях единичного производства. Азотирование вытяжных и гибочных матриц и пуансонов повышает их поверхностную твердость и износостойкость. Твердость поверхности инструмента, насыщенной нитридами, после азотирования составляет HV 800—1150. В итоге азотирование способствует повышению экономичности технологического процесса штамповки.

Для изготовления вкладышей подшипников скольжения из стали, покрытой бронзой, применяли инструмент из хромованадиево-молибденовой стали, закаленной до HRC 60. Однако при штамповке, вследствие адгезионного изнашивания, происходило быстрое разрушение инструмента. После замены указанной стали на быстрорежущую с более высокой температурой отпуска и последующим жидкостным азотированием при 570 °С в течение 1 ч стойкость штампа возросла в 3—5 раз.

Другим вариантом азотирования является азотирование в пасте. Применение этого способа при вытяжке деталей амортизатора грузового автомобиля позволило повысить стойкость рабочих деталей штампа до 250—300 тыс. нагружений вместо 8—10 тыс. нагружений с улучшенными поверхностями рабочих деталей даже тогда,

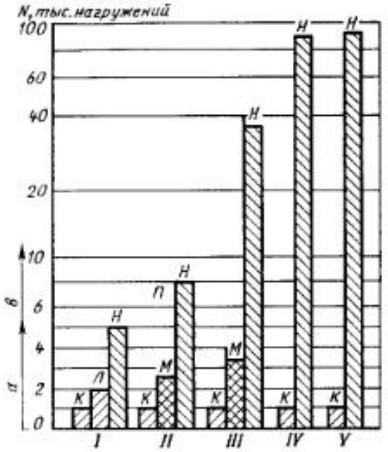


Рис. 15. Диаграмма сравнительных стойкостных испытаний пуансона для пробивки отверстий в стальных листах толщиной до 2 мм:

а — линейная шкала; *б* — логарифмическая шкала; *I* — листовая электросталь; *II* — коррозионно-стойкая хромоникелевая сталь; *III* — сталь для глубокой вытяжки; *IV* — улучшаемая сталь с 0,6 % С; *V* — конструкционная углеродистая сталь с 0,2 % С (*К* — без покрытия; *Л* — твердое хромирование; *М* — азотирование; *Н* — покрытие карбидом титана; *П* — граница экономически эффективного применения CVD-процесса)

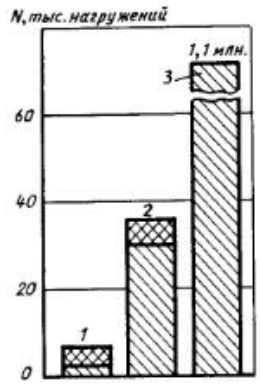


Рис. 16. Диаграмма сравнительных стойкостных испытаний различных способов покрытия инструмента при вытяжке кронштейна легкового автомобиля:

1 — улучшение; *2* — твердое хромирование; *3* — покрытие карбидом титана с помощью CVD-процесса

когда штамп выходил из строя из-за адгезионного схватывания.

Электролитическое хромирование. Этот способ применяют с целью повышения твердости и износостойкости пуансонов и матриц; он также сравнительно прост, как и предыдущий. Хотя электролитическое хромирование не всегда обеспечивает значительное повышение стойкости, однако оно имеет другое важное преимущество, которое заключается в том, что изношенный слой может быть снова восстановлен.

Хромирование небольших вытяжных матриц и пуансонов применяют с целью восстановления их размеров после изнашивания. Размеры пуансонов и матриц после окончательной механической обработки должны учитывать толщину наносимого слоя хрома. Толщину хромового покрытия выбирают в зависимости от условий эксплуатации от 0,01 до 0,06 мм.

Борирование. Борирование в пасте отличается тем, что обеспечивает очень малую шероховатость поверхности ($Rz = 1{,}96 \pm 0{,}3$ мкм), что весьма благоприятно влияет на процесс деформирования.

Сравнительные стойкостные испытания вытяжных матриц при изготовлении стаканчиков из алюминия марки А99 показали, что первое кольцо, изготовленное из улучшенной стали, выдержало до схватывания и задира около 2000 нагружений; второе вытяжное кольцо, подвергнутое твердому хромированию, сработалось только после 6000 нагружений. Борирование в пасте позволило довести стойкость вытяжного кольца до 10 000 нагружений. При этом шероховатость поверхности борированного вытяжного кольца практически не изменилась.

Способ изготовления вырубных штампов с применением борирования съемников—направляющих пуансонов, позволяет получать равномерные зазоры между их режущими кромками. Это снижает трудоемкость изготовления, доводки и сборки рабочих элементов такого рода штампов.

При борировании съемников повышается их износостойкость, так как

микротвердость рабочих поверхностей в окне съемника повышается и достигает 18 000—24 000 МПа. Глубина упрочненного слоя зависит от режимов борирования и может достигать 0,2—0,25 мм.

Ванадирование. Образование на поверхности деформирующего инструмента слоя карбида ванадия (VC) обеспечивает значительное повышение стойкости как при листовой, так и при холодной объемной штамповке.

Эффективность ванадирования иллюстрируется на примере повышения стойкости вытяжного кольца при изготовлении деталей автомобилей из углеродистой конструкционной стали. Стойкость вытяжных матриц из закаленной быстрорежущей стали едва достигает нескольких сотен деталей, тогда как применение твердосплавных матриц (с содержанием 15 % Со) позволяет довести ее до 1000—4000 нагружений. Ванадированные вытяжные матрицы из инструментальной стали, легированной хромом, молибденом и ванадием, обеспечивают в среднем около 20 000 нагружений.

Значительное увеличение шероховатости при применении данного покрытия требует тщательного полирования инструмента перед его эксплуатацией.

Покрытие карбидом титана. Такое покрытие создается осаждением на поверхность инструмента твердых материалов из газовой фазы с помощью CVD- и PVD-процессов. Эти способы в настоящее время усовершенствованы и освоены и представляют собой неотъемлемую составную часть инструментального производства.

Внедрение вакуумно-плазменной технологии нанесения карбида титана (TiC) и нитрида титана (TiN) требует относительно высоких затрат на приобретение оборудования (промышленных установок). Однако необходимо учитывать, что эти затраты в значительной степени компенсируются сокращением простоев прессового оборудования за счет повышения стойкости штампового инструмента, особенно в условиях автоматизированного производства. Немаловажное значение имеет и повышение качества выпускаемой продукции.

На рис. 15 показана диаграмма с результатами сравнительных стойкостных испытаний пуансона для пробивки отверстий в стальных листах толщиной 2 мм. Видно, что пуансоны, покрытые TiC, показали наивысшую стойкость, за исключением трудно разделяемых аустенитных сталей и листовой трансформаторной стали. Стойкость при штамповке других материалов увеличивается в 10—100 раз.

На рис. 16 приведены результаты сравнительных стойкостных испытаний для различных способов обработки рабочих частей штампа (на пятой позиции) при вытяжке кронштейна легкового автомобиля. Кронштейн штамповали из стали для глубокой вытяжки толщиной 2 мм. На пятой позиции штампа деформации достигают максимума и имеет место интенсивное изнашивание. Из рисунка видно, что стойкость инструмента, покрытого карбидом титана, превышает 1 млн. нагружений. Причем поверхность инструмента после штамповки 1,1 млн. нагружений оказалась практически неповрежденной. Этот пример доказывает, что покрытия карбидом титана обладают высокой прочностью и весьма хорошими антифрикционными свойствами.

Глава 20 СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ЛИСТОШТАМПОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Прессы однокривошипные открытые простого действия (табл. 1) выполняют с неподвижным столом (наклоняемые и ненаклоняемые), с передвижным столом (ненаклоняемые). Эти прессы предназначены для выполнения операций холодной штамповки, используются в составе роботизированных технологических комплексов.

В зависимости от размеров стола прессы изготовляют следующих исполнений: 1 — с уменьшенными размерами стола; 2 — с нормальными; 3 — с увеличенными.

Конструкция пресса с неподвижным столом должна предусматривать возможность установки средств механизации и автоматизации, а также встраивания в поточные или автоматические линии.

По заказу потребителя прессы с передвижным столом оснащают рогом.

Прессы с неподвижным столом в зависимости от вида производства, штампуемого материала и выполняемой технологической операции оснащают:

валковыми, клещевыми подающими устройствами для подачи ленточного материала;

валковыми подающими устройствами для подачи полосового материала;

грейферными, револьверными, шиберными подающими устройствами, руками механическими, промышленными роботами для подачи штучных заготовок;

подушками в столе (прессы усилием 160—1000 кН).

Для прессов усилием до 63 кН допускается ступенчатое изменение частоты ходов ползуна.

Прессы изготовляют с выталкивателями в ползуне.

Размеры и расположение пазов и отверстий для крепления штампов прессов — по ГОСТ 9226—79.

Основные параметры и размеры прессов должны соответствовать указанным на рис. 1, 2 и в табл. 1.

Прессы однокривошипные закрытые простого действия предназначены для выполнения различных операций холодной штамповки деталей из ленточного, листового и полосового материала (табл. 2, исполнения 1 и 2) и обрезки поковок (исполнение 3).

По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования и с подушками в столе усилием до 20 % номинального усилия пресса и ходом не менее 25 % от хода ползуна, а также оснащают предохранителями по усилию.

Прессы однокривошипные закрытые простого действия с круговым исполнительным механизмом (табл. 3) предназначены для вырубки изделий из листа, для обрезки облоя и других короткоходовых разделительных и формообразующих операций. Автоматизированное исполнение прессов с валковой подачей, роликовым конвейером и конвейером выгрузки.

Прессы двухкривошипные открытые простого действия (табл. 4) предназначены для вырубки, неглубокой вытяжки, гибки деталей из листового, ленточного и полосового металла и для других холодноштамповочных работ. По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования.

Прессы двухкривошипные закрытые простого действия (табл. 5) предназначены для вырубки, неглубокой вытяжки, гибки деталей из листового и полосового металла и для других холодноштамповочных работ. По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования.

Прессы четырехкривошипные закрытые простого действия (табл. 6) предназначены для вырубки, вытяжки, гибки деталей из листового и полосового материала и для других холодноштамповочных операций; преимущественно применяются для штамповки крупногабаритных деталей сложной конфигурации. По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования.

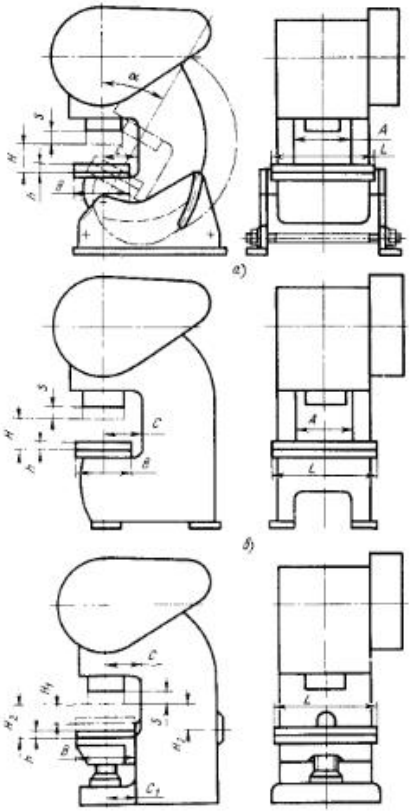


Рис. 1. Схемы прессов:
а — наклоняемого; *б* — ненаклоняемого; *в* — с передвижным столом и рогом

Путь ползуна до его крайнего положения, на котором пресс развивает номинальное усилие, составляет для всех прессов 12 мм независимо от номинального усилия и исполнения.

Прессы однокривошипные закрытые двойного действия (табл. 7) предназначены для изготовления деталей из листового материала, требующих глубокой вытяжки.

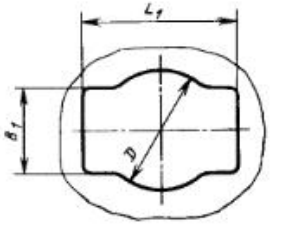


Рис. 2. Размеры отверстия в столе (для прессов показанных на рис. 1)

По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования.

По заказу прессы изготовляют с подушками в столе до 20 % номинального усилия вытяжного ползуна и ходом не менее 25 % хода вытяжного ползуна, а также с гидропредохранителями, устройствами для ускоренной смены штампов и микроприводов (прессы усилием свыше 1000 кН).

Прессы двухкривошипные закрытые двойного действия (табл. 8) предназначены для изготовления деталей из листового материала, требующих глубокой вытяжки; преимущественно применяют для штамповки изделий сложной конфигурации. Одновременно с вытяжкой на прессах можно осуществлять вырубку по контуру. По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования.

Прессы четырехкривошипные закрытые двойного действия (табл. 9) предназначены для изготовления из листового материала крупногабаритных деталей, требующих глубокой вытяжки; преимущественно применяют для штамповки деталей сложной конфигурации. Одновременно с вытяжкой на прессах можно осуществлять вырубку по контуру. По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования.

Прессы для пробивки отверстий (табл. 10) предназначены для пробивки отверстий в листовом, сортовом и фасонном прокате.

1. Основные параметры прессов однокривошипных открытых простого действия (размеры, мм)

Параметр **	Нормы для исполнения											
	2	2	2	2	1 *	2	1 *	2	3 *	1 *	2	3 *
Номинальное усилие, кН	25	40	63	100	160		250			400		
Ход ползуна регулируемый S: наибольший, не менее	36	45	50	63	71		80			90		
наименьший, не более	4						5			10		
Частота ходов ползуна, $мин^{-1}$: непрерывных нерегулируемых, не менее	224	200			180				75	160		71
непрерывных регулируемых: наименьшая, не более	200	170	150	85	—	80	—	75	—	—	71	—
наибольшая, не менее	400	300	250		—	240	—	230	—	—	160	—
одиночных, не менее		63			60		56		40	56		40
Размеры стола, не менее: L	280	315	360	450	420	500		560	630	600	630	710
B	180	250	280	340	280	380	340	420	460	400	460	580
Размеры отверстия в столе, не менее: L_1	—	—	150	180	210		250			300		
B_1	—	—	100	115	140		170			200		
D	90		120	150	180		210			250		
Расстояние от оси ползуна до станины C, не менее	100	132	150	180	160	200	190	230	250	220	250	315

Наибольшее расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении при наибольшем ходе: прессы с неподвижным столом H	180	190	200	230	250		280			300		340
прессы с передвижным столом: при верхнем положении стола H_1	—	—	—	—	—	—	180		—	200		—
при нижнем положении стола H_2	—	—	—	—	—	—	450		—	500		—
Наибольшее расстояние H_3 между осью отверстия для рога и ползуном в его нижнем положении при наибольшем ходе	—	—	—	—	—	—	210		—	250		—
Расстояние C_1 от оси ползуна до плоскости крепления стола к станине, не менее	—	—	—	—	—	—	180	220	—	210	240	—
Расстояние A между стойками станины в свету, не менее	90	100	120	160	200			240			280	
Регулирование расстояния между столом и ползуном, не менее	32	36	40		45		55			65		
Толщина подштамповой плиты h: номинальная	36	40	45	65	71		75			80		
пред. откл.		—0,62					—0,74					

Продолжение табл. 1

Параметр **	Нормы для исполнения											
	2	2	2	2	1 *	2	1 *	2	3 *	1 *	2	3 *
Удельная материалоемкость *** (без средств механизации и автоматизации) $K_м$, кг/(кН·м$^{-1,67}$), не более:												
прессов ненаклоняемых:												
с нерегулируемой частотой ходов				122	103,6	84,6	75,6	65,9	60,6	56,5	53,3	48,5
с регулируемой частотой ходов	414	260	150	140,3	—	97,6	—	75,9	—	—	61,2	—
прессов наклоняемых с нерегулируемой частотой ходов	—	—	152	128	105,1	88,4	75,2	68,8	63,1	59	54,8	50,4
прессов с передвижным столом с нерегулируемой частотой ходов	—	—	—	—	—	—	87,1	69,9	—	59,2	52	—
Удельная энергоемкость *** $K_э$, Вт/(кН·мин$^{-1}$), не более:												
прессов с нерегулируемой частотой ходов				6,0	6,0	6,0	9,4	9,4	12,8	13,3	13,3	19,8
прессов с регулируемой частотой ходов	3,8	4,6	4,8	6,9	—	6,9	—	10,7	—	—	15,3	—

Параметр **	Нормы для исполнения													
	1 *	2	3 *	1 *	2 *	3 *	1 *	2 *	3 *	1 *	2 *	3 *	2 *	3 *
Номинальное усилие, кН	630			1000			1600			2500			4000	
Ход ползуна регулируемый S:														
наибольший, не менее	100			130			160			200			224	
наименьший, не более			10							25				

Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$:														
непрерывных нерегулируемых, не менее	140		63	100		56	71		45	60		40	45	36
непрерывных регулируемых:														
наименьшая, не более	—	63	—	—			—			—			—	
наибольшая, не менее	—	140	—	—			—			—			—	
одиночных, не менее	45		40	45		35	28			25			20	
Размеры стола, не менее:														
L	710	800	900	850	950	1120	1000	1120	1400	1120	1250	1400		1600
B	480	560	650	560	630	800	670	750	900	750	850	900	950	1060
Размеры отверстия в столе, не менее:														
L_1	360			420			480			530			600	
B_1	240			280			320			360			400	
D	300			360			420			480			530	
Расстояние от оси ползуна до станины C, не менее	260	300	340	320	340	420	360	400	480	400	450	480	500	560
Наибольшее расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении при наибольшем ходе:														
прессов с неподвижным столом H	340			400			480			560			670	710
прессов с передвижным столом:														
при верхнем положении стола H_1	240		—	280		—	340		—	—			—	
при нижнем положении стола H_2	530		—	560		—	600		—	—			—	

Продолжение табл. 1

Параметр **	Нормы для исполнения													
	1 *	2	3 *	1 *	2 *	3 *	1 *	2 *	3 *	1*	2 *	3 *	2 *	3 *
Наибольшее расстояние H_3 между осью отверстия для рога и ползуном в его нижнем положении при наибольшем ходе	280		—	320		—	360		—	—		—		
Расстояние C_1 от оси ползуна до плоскости крепления стола к станине, не менее	250	529	—	300	320	—	340	380	—	—		—		
Расстояние A между стойками станины в свету, не менее	340			400			480			560			800	
Регулирование расстояния между столом и ползуном, не менее	80			100			120			140			160	
Толщина подштамповой плиты h: номинальная пред. откл.	85			100 −0,87			110			125 −1,0			140	

Удельная материалоемкость *** (без средств механизации и автоматизации) $K_м$, кг/(кН·м$^{-1,67}$), не более:														
прессов ненаклоняемых:														
с нерегулируемой частотой ходов	45,7	45,9	37,1	36,7	33,5	32,0	25,5	26,0	23,7	21,5	21,0	20,6	12,97	12,32
с регулируемой частотой ходов	—	52,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
прессов наклоняемых с нерегулируемой частотой ходов	48,2	46,9	41,9	37,3	34,0	32,5	25,8	26,3	24,1	—	—	—	—	—
прессов с передвижным столом с нерегулируемой частотой ходов	48,9	43,0	—	44,2	38,0	—	33,0	31,0	—	—	—	—	—	—
Удельная энергоемкость *** $K_э$, Вт/(кН·мин$^{-1}$), не более:														
прессов с нерегулируемой частотой ходов	13,7	13,7	21,5	15,0		21,5	16,8		22,3	22,4		28,0	25,0	27,8
прессов с регулируемой частотой ходов	—	15,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* По заказу потребителя прессы изготовляют с регулируемой частотой ходов.

** Угол наклона станины $\alpha = 30°$.

*** Удельную материалоемкость $K_м$ и удельную энергоемкость $K_э$ подсчитывают по следующим формулам:

$$K_м = \frac{M}{PF^{0,5}(SH)^{0,33}}; \qquad K_э = \frac{N}{0,01Pn},$$

где M — масса пресса, кг (без средств механизации и автоматизации); P — номинальное усилие пресса, кН; F — площадь стола, м^2; S — ход ползуна наибольший, м; H — наибольшее расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении при наибольшем ходе, м; N — номинальная мощность электродвигателя главного привода, Вт; n — наибольшая частота ходов ползуна, мин$^{-1}$.

2. Основные параметры прессов однокривошипных закрытых простого действия

Параметр	Нормы для исполнений														
	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2
Нормальное усилие, кН	1600			2000		2500			3150		4000			5000	
Ход ползуна, мм	160	320	250	160	320	200	400	320	200	400	250	500	400	250	500
Частота непрерывных ходов ползуна, мин$^{-1}$	60	25	40	40	25	40	20	32	32	20	28	16	25	25	16
Расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении при верхнем положении регулирования, мм	480	630	450	480	630	560	710	530	560	710	670	800	630	670	800
Размер регулирования между столом и ползуном, мм	120			140					160					160	
Размеры стола, мм	800×800								1000×1000					1250; 1250	
Размеры отверстия в столе, мм	500								630					630; 800	
Размер ползуна спереди — назад мм, не менее	630								800					800; 1000	
Толщина подштамповой плиты, мм	120					140					160			180	
Мощность привода, кВт	27,45					35,95	40								
Масса, т	14,5					20,6			30,4	34,5	35,5	32,2			

Продолжение табл. 2

Параметр	Нормы для исполнений														
	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	1	3	1	1	3
Нормальное усилие, кН	6300			8000		10 000			12 500		16 000		20 000	25 000	
Ход ползуна, мм	320	630	400	320	630	400	800	500	400	800	400	630	400	500	630
Частота непрерывных ходов ползуна, мин$^{-1}$	20	12	20	20	12	20	10	16	16	10	16	10	16	12	12
Расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении при верхнем положении регулирования, мм	800	900	750	800	900	950	1 000	900	950	1 000	1 120	1 060	1 120	1 320	1 250
Размер регулирования между столом и ползуном, мм	180					200					220			220	
Размеры стола,. мм	1250										1 600		1 600	2 000	
Размеры отверстия в столе, мм				800	1000						1 000		1 000	1 250	
Размер ползуна спереди — назад, мм, не менее				1000	1250						1 250		1 250	1 600	
Толщина подштамповой плиты, мм	180			200		220					250		250	280	
Мощность привода, кВт						75					110			125	
Масса, т	50,5					77,6			77,6		48,7			231	

3. Основные параметры прессов однокривошипных закрытых простого действия с круговым исполнительным механизмом

Параметр	Нормы	
Номинальное усилие, кН	2500	4000
Ход ползуна, мм	130	150; 70
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	40	32; 40
Наибольшее расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении, мм	420	640; 600
Размеры стола, мм	670×1000	1000×1740
Мощность привода, кВт	31,5	50
Масса, т	18,85	34

По заказу потребителя прессы поставляют с подающим и отводящим роликовыми конвейерами; с приспособлением для трехпуансонной пробивки отверстий по шаблону.

Прессы координатно-револьверные (табл. 11) предназначены для последовательной пробивки отверстий различной конфигурации и размеров в листовом материале. Прессы оснащают револьверной головкой, координатным столом и копирующим устройством.

Прессы координатно-револьверные с числовым программным управлением (табл. 12) предназначены для получения плоских деталей из листового материала путем последующего осуществления операций позиционной вырубки, пробивки, высечки, обрубки узлов и других операций; поставляют со средствами механизации загрузки заготовки и выгрузки готовой детали с координатного стола.

Прессы гидравлические листоштамповочные простого действия рамные с гидроподушкой (табл. 13) предназначены для глубокой вытяжки деталей из тонкого листа в холодном состоянии (могут выполнять все другие операции холодной листовой штамповки). По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования.

Прессы гидравлические листоштамповочные двойного действия колонные (табл. 14) предназначены для изготовления крупногабаритных деталей из толстолистового металла, требующих глубокой вытяжки. Прессы оснащают выдвижным столом.

Прессы гидравлические одностоечные (табл. 15) предназначены для различных штамповочных операций. По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации.

4. Основные параметры прессов двухкривошипных открытых простого действия

Параметр	Нормы		
Номинальное усилие, кН	1000	1600	2500
Ход ползуна, мм	100; 200	250	350; 250
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	50; 40	40	30
Наибольшее расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении, мм	450; 600	610; 750	760
Размеры стола, мм	2000×670	1800×1020; 2000×750	2330×1020
Мощность привода, кВт	15,5	25	30
Масса, т	15,7	32,4	53,3

5. Основные параметры процессов двухкривошипных закрытых простого действия (ГОСТ 7766—83)

Параметр	Нормы										
Номинальное усилие, кН	1000	1600	2500	3150	5000	8000	10 000	16 000	25 000	40 000	
Ход ползуна, мм	160	200; 250 320	200; 400	400	250	320	400	400	630	630	
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	50	24; 32; 48	25	25	25; 32	20; 25	20	16	10	10	
Наибольшее расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении, мм	500	630; 780	630; 750	750	750	900	1 060	1 060	1 500	1800	
Размеры стола, мм	1250×800	2000×1250	2000×1250	2500×1250	2500×1400	2500×1600; 3150×1600	3 150×1 800	4 000×2 000; 5 000×2 000	5 000×2 000	5 000×2 000	
Мощность привода, кВт	25,5	17; 20; 25; 22	27; 40	47	47	75,0	132	132	200	—	
Масса, т	13,7	29,7; 28,0	45,3; 50,2	50,9	69,2	87,0; 97,0	193	355	550	—	

6. Основные параметры прессов четырехкривошипных закрытых простого действия

Параметр	Нормы					
Номинальное усилие, кН	5000	8000	10 000	16 000	40 000	63 000
Ход ползуна, мм	630	800	900	710	500	500
Частота ходов ползуна, $мин^{-1}$	18; 15; 24	15; 20; 24	—	16	6,5	10
Наибольшее расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении, мм	1850; 1400; 1230	2050	1 750	1 500	1 250	2 100
Размеры стола, мм	3150×1800; 3200×1700; 3150×1800	4000××2240	4 500××2 500	4 000××2 500	5 000××3 000	12 000××2 000
Мощность привода, кВт	100; 68	132	160	160	250	320
Масса, т	190; 123	250	300	306	814	1 100

Прессы гидравлические листоштамповочные одностоечные отбортовочные с числовым программным управлением (табл. 16) предназначены для горячей и холодной гибки, отбортовки и штамповки деталей из листового, полосового и других материалов.

Автоматы листоштамповочные многопозиционные (табл. 17) предназначены для последовательной многопозиционной штамповки деталей из ленты, полосы и штучных заготовок с автоматическим переносом штампуемых деталей по позициям. По заказу потребителя прессы поставляют с механизмом подачи штучных заготовок; автоматы усилием 100—1000 кН оснащают устройствами для штамповки в два потока, а автоматы усилием от 1800 кН и выше оснащают грейферной подачей с перемещением линеек с захватами по двум и трем координатам.

Автоматы листоштамповочные многопозиционные кулачковые (табл. 18) предназначены для последовательной многооперационной штамповки из металлической рулонной ленты с автоматическим переносом штампуемых деталей по позициям. По заказу потребителя прессы оснащают устройством для автоматической штамповки из штучных заготовок.

Автоматы листоштамповочные с нижним приводом (табл. 19) предназначены для выполнения различных операций листовой штамповки деталей из ленты и полосы.

Прессы-автоматы вырубные быстроходные (табл. 20) предназначены для вырубки деталей из тонколистового материала.

Прессы-автоматы перфорационные (табл. 21) предназначены для перфорации деталей типа решет, сит и сеток из листового и рулонного материалов.

Прессы-автоматы для чистовой вырубки (табл. 22) предназначены для изготовления из ленты и полосы деталей, к поверхности разделения и точности которых предъявляются повышенные требования.

Молоты листоштамповочные воздушные (табл. 23) предназначены для штамповки деталей из листового материала.

Ножницы высечные (табл. 24) предназначены для прямой, круговой и фигурной резки листового материала. По заказу потребителя прессы комплектуют координатным устройством

7. Основные параметры прессов однокривошипных закрытых двойного действия (ГОСТ 7639—73)

Параметр	Нормы							
Номинальное усилие ползуна, кН: вытяжного	630	1000	1600	2500	3150	4000	5000	6300
прижимного	400	630	1000	1600	2000	2500	3150	4000
Ход ползуна, мм: вытяжного	400		500		630		800	
прижимного	250		320		400		500	
Частота ходов ползуна, $мин^{-1}$	20—30		16—25		10—16		9—14	
Расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении при верхнем положении регулирования, мм: вытяжного	560		710		900		1120	
прижимного	500		630		800		1000	
Размеры стола, мм	630××630	800××800	800××800	—	1250××1250	—	—	1600××1600
Размеры ползуна: вытяжного	400		500		1000	1250	1600	
прижимного (спереди — назад)	630		800		630	800	100	
Мощность привода, кВт	33	30	45	—	75	—	—	100
Масса, т	11,5	20	40	—	62,7	—	120,0	

Примечания: 1. Путь вытяжного и прижимного ползунов до их крайнего положения, на котором пресс развивает номинальное усилие, составляет 16 мм для вытяжного ползуна и 6 мм — для прижимного независимо от номинального усилия.

2. Муфта и тормоз пресса должны обеспечивать число одиночных включений не менее 75 % частоты непрерывных ходов ползуна в минуту, указанной в таблице.

3. Прессы изготовляют с окнами в стойках шириной не менее 0,6 от размера стола спереди—назад.

4. По заказу потребителя прессы изготовляют с подушками в столе с усилием до 20 % номинального усилия вытяжного ползуна; поставляют с устройствами для механизации установки и съема штампов.

8. Основные параметры прессов двухкривошипных закрытых двойного действия (ГОСТ 8247—70)

Параметр	Нормы	
Номинальное усилие, кН	5000	6300
Номинальное усилие прижимного ползуна, кН	5000	6300
Ход внутреннего ползуна, мм	850	1000
Частота ходов ползуна, $мин^{-1}$	10; 15	8
Наибольшее расстояние между столом и внутренним ползуном в его нижнем положении, мм	2520	—
Размеры стола, мм	3150×2000	5000×2240
Мощность привода, кВт	132; 110	—
Масса, т	267	—

Примечания: 1. Путь вытяжного и прижимного ползунов до их крайнего нижнего положения, на котором пресс развивает номинальное усилие, должен быть 16 мм для вытяжного ползуна и 6 мм для прижимного независимо от номинального усилия.

2. Муфта, тормоз и система управления ими должны обеспечивать число одиночных включений не менее 75 % частоты непрерывных ходов ползуна, указанных в таблице.

3. Прессы изготовляют с окнами в стойках шириной не менее 0,6 размера стола спереди — назад.

4. Размеры и расположение пазов и отверстий для крепления штампов прессов — по ГОСТ 9226—69.

9. Основные параметры прессов четырехкривошипных закрытых двойного действия (ГОСТ 16268—70)

Параметр	Нормы	
Номинальное усилие, кН	6300	10 000
Номинальное усилие наружиого ползуна, кН	4000	6 300
Ход внутреннего ползуна, мм	1000	1 000
Частота ходов ползуна, $мин^{-1}$	8—14	12—18
Наибольшее расстояние между столом и внутренним ползуном в его нижнем положении, мм	1800	2 065
Размеры стола, мм	3150×2500	4 500×2 500
Мощность привода, кВт	132	150
Масса, т	269	352

Примечания: 1. Путь вытяжного и прижимиого ползунов до их крайиего положения, на котором пресс развивает номинальное усилие, составляет 16 мм для внутреннего ползуна и 6 мм — для прижимного независимо от номиналь-ного усилия.

2. Муфта и тормоз пресса должны обеспечивать число одиночных включений не менее 75 % частоты непрерывных ходов ползуна в минуту, указаниой в таблице.

3. Прессы изготовляют с окнами в стойках шириной ие менее 0,65 размера стола спереди — иазад.

4. По заказу потребителя прессы изготовляют с подушками в столе с усилием до 20 % номиналь-ного усилия вытяжиого ползуна; поставляют с устройствами для механизации установки и съема штампов.

10. Основные параметры прессов для пробивки отверстий (ГОСТ 7355—77)

Пар аметр	Нормы		
Номиналыное усилие, кН	630	1250	1600
Диаметр пробиваемого отверстия, мм	32	40	42
Толщина материала, мм	16	25	32
Расстояние от оси пуансоиа до станины, мм	500	600	750
Частота ходов ползуна, $мин^{-1}$	56	45	25
Мощность привода, кВт	6,3	6,3	—
Масса, т	1,96	4,45	—

11. Основные параметры координатно-револьверных прессов

Параметр	Норма
Номинальное усилие, кН	100
Наибольшие размеры заготовки, мм	630×1000
Наибольший диаметр пробивки, мм	70
Число комплектов рабочего ииструмеита	24
Ход ползуна, мм	20
Мощность привода, кВт	1,1
Масса, т	4,0

12. Основные параметры координатно-револьверных прессов с ЧПУ (ГОСТ 24225—80Е)

Параметр	Нормы			
Номинальное усилие, кН	160	400	630	1000
Номиналыные размеры обрабатываемого листа, мм	1200×800×6,0	1800×1000×6,0	2000×1200×8,0	2000×1200×8,0
Наибольший диаметр пробиваемого отверстия, мм	90	90	170	200
Частота ходов ползуна, $мин^{-1}$	200	140	120	10
Число позиций инструмента	28	28	32	28
Ход ползуна, мм	32	32	40	40
Мощность привода, кВт	5,5	7,5	8,5	17
Масса, т	13,2	14	20,0	24

13. Основные параметры гидравлических листоштамповочных рамных прессов простого действия с гидроподушкой

Параметр	Нормы		
Номинальное усилие ползуна, кН	1600	2500	6300
Ход ползуна, мм	600	710	1000
Наибольшее расстояние между столом и ползуном, мм	1145	1400	1800
Размеры стола, мм	1000×1120	1700×1400	2500×1800
Скорость ползуна, мм/с:			
при рабочем ходе	27—54	16—100	35—130
при холостом ходе	400	400	500
при возвратном ходе	185—370	100—320	375
Мощность привода, кВт	58,5	63	165
Масса, т	36	58	73,0

14. Основные параметры прессов гидравлических листоштамповочных двойного действия колонных

Параметр	Нормы			
Номинальное усилие траверсы, кН:				
вытяжной	6300	8000	16 000	25 000
прижимной	1000	5000	10 000	16 000
Наибольшее расстояние между столом и вытяжной траверсой, мм	2600	2600	2 500; 4 000	3 900
Ход вытяжной траверсы, мм	1700	1700	1 400; 2 500	2 500
Размеры стола, мм	3550×3550	2650×2650	3 550×3 550	6 000×5 500
Скорость рабочего хода вытяжной траверсы, мм/с	33	32	24,4; 28	20
Мощность привода, кВт	240	296	434; 367,4	631
Масса, т	353	280,1	594,4; 601	1 550

15. Основные параметры прессов гидравлических одностоечных

Параметр	Нормы			
Номинальное усилие, кН	100	250	400	630
Наибольший ход ползуна, мм	450	500	500	500; 560
Наибольшее расстояние между столом и ползуном, мм	630	710	710	710; 800
Размеры стола, мм	500×500	630×480; 630×560	630×560	630×560; 800×630

Продолжение табл. 15

Параметр	Нормы			
Скорость ползуна, мм/с:				
при холостом ходе	550	350; 400	250	250; 380
при рабочем ходе	40	20; 36	16	18; 35
при возвратном ходе	550	350; 550	350	350; 400
Мощность привода, кВт	—	7,5	7,5	15
Масса, т	—	2,3	3,12	3,6

Параметр	Нормы			
Номинальное усилие, кН	1000	1600	2500	4000
Наибольший ход ползуна, мм	500	500; 630	500	710
Наибольшее расстояние между столом и ползуном, мм	750	750; 900	800	1000
Размеры стола, мм	800×630	800×630; 1000×710	1000×630	1250×800
Скорость ползуна, мм/с:				
при холостом ходе	180	250; 380	125	250
при рабочем ходе	8	10; 25	40	9
при возвратном ходе	240	250; 420	420	250
Мощность привода, кВт	11	18	15	—
Масса, т	6,2	7,88	11	—

16. Основные параметры прессов гидравлических листоштамповочных одностоечных отбортовочных с ЧПУ

Параметр	Нормы		
Номинальное усилие, кН	4000	8000	12 500
Ход вертикального ползуна, мм	1200	1200	1 200
Наибольшее расстояние между столом и вертикальным ползуном, мм	1800	2200	2 200
Расстояние от оси вертикального ползуна до станины, мм	1100	1500	1 900
Размеры стола, мм	2400×2000	3600×2600	4 500×3 000
Скорость рабочего хода вертикального ползуна, мм/с	18	18	13
Мощность привода, кВт	78,4	127,4	132,4
Масса, т	82	180	327

17. Основные параметры автоматов листоштамповочных многопозиционных (ГОСТ 8260—78)

Параметр	Нормы									
Номинальное усилие, кН	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300	10 000
Ход ползуна, мм	100	125	160	200	250	280	320	360	400	450
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	60—140	50—130	50—110	30—90	25—75	25—48	20—42	18—36	15—30	12—25
Наибольшее расстояние между столом и патроном при нижнем положении ползуна, мм	320	400	400	500	500	670	670	800	800	1 000
Регулирование расстояния между столом и патроном, мм	30	40	40	50	50	60	60	80	80	100
Расстояние между позициями, мм	80	100	130	170	210	250	300	400	500	500
Число позиций	10	10	10	10	8	9	9	9	9	9
Мощность привода, кВт	4,5	6,0	11,0	21,9	32,0	45	35	71	110	160
Масса, т	4,7	7,73	15,6	26,9	34,7	77,9	87	116	200	250

18. Основные параметры автоматов листоштамповочных многопозиционных кулачковых

Параметр	Нормы		
Номинальное усилие, кН	63	160	250
Ход ползуна, мм	—	100	125
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	100—250	60—180	50—150
Расстояние между позициями, мм	36	80	100
Число рабочих позиций	10	10	10
Наибольшая ширина ленты, мм	24	115	150
Максимальный диаметр заготовки, мм	21	70	90
Усилие пружинного прижима в столе, кН	—	3	4,8
Мощность привода, кВт	1,5	4,0	5,5
Масса, т	1,6	3,8	5,8

и опорным столом для резки листов толщиной 4 мм и выше.

Ножницы листовые двухдисковые с наклонными ножами (табл. 25) предназначены для прямой, круговой и фигурной резки косого среза под сварку, отбортовки и гибки листового металла. По заказу потребителя прессы поставляют со стоечным роликовым конвейером.

Обрабатывающие центры на базе координатно-револьверных прессов с числовым программным управлением (табл. 26) предназначены для последовательной пробивки отверстий различной конфигурации и размеров в листовом материале, для высечки, фрезерования и других операций.

Прессы листогибочные кривошипные (табл. 27) предназначены для изготовления деталей из листового и полосового проката методом гибки. По заказу потребителя прессы поставляют со средствами механизации и автоматизации и дополнительными устройствами для защиты опасных зон.

19. Основные параметры автоматов листоштамповочных с нижним приводом (ГОСТ 10739—84)

Параметр	Нормы			
Номинальное усилие, кН	100	160	250	400
Ход траверсы, мм	12	16	20	25
Частота ходов траверсы, мин$^{-1}$:				
наибольшая	1200	710	800	1000
наименьшая	760	140	125	100
Расстояние между направляющими втулками колонн, мм	280×140	360×160	450×200	560×280
Наибольшая толщина ленты, мм	1,4	1,6	2,0	2,5
Наибольшая подача ленты, мм	50	90	110	140
Мощность привода, кВт	7,5	—	10	14
Масса, т	1,76	—	3,5	4 44

Параметр	Нормы			
Номинальное усилие, кН	630	1000	1600	2500
Ход траверсы, мм	28	32	40	50
Частота ходов траверсы, мин$^{-1}$:				
наибольшая	800	400	250	200
наименьшая	80	80	50	40
Расстояние между направляющими втулками колонн, мм	710×360	900×450	1120×560	1400×710
Наибольшая толщина ленты, мм	2,8	3,2	2,0	2,0
Наибольшая подача ленты, мм	180	250	280	350
Мощность привода, кВт	20	32,85	42	35
Масса, т	9,135	15,17	22,4	35

20. Основные параметры прессов-автоматов вырубных быстроходных

Параметр	Нормы				
Номинальное усилие, кН	250	630	1000	1600	4000
Ход ползуна, мм	16	20	30	30	40
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	160—800	100—630	100—500	—	300—250
Наибольшее расстояние между столом и ползуном, мм	200	420	325	—	750
Размеры стола, мм	570×410	870×900	1300×1200	—	2300×1200
Наибольшие размеры ленты (толщина×ширина), мм	2×160	1×320	1,6×320	—	2×500
Мощность привода, кВт	7,5	18,5	30	—	75
Масса, т	4,43	12,2	25,4	—	85

21. Основные параметры прессов-автоматов перфорационных

Параметр	Нормы				
Номинальное усилие, кН	400	630	1000	2000	4000
Ход ползуна, мм	25	16	20	20	50
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	150; 500	130; 190; 250	150—400	75; 150	50—100
Наибольшее расстояние между столом и ползуном в его нижнем положении, мм	290	400	500	655	710
Мощность привода, кВт	22	13	30	38	85,7
Масса, т	8,56	10,6	16,5	24,6	47,7

22. Основные параметры прессов-автоматов для чистовой вырубки

Параметр	Нормы					
Номинальное усилие, кН	400	1000	1600	2500	4000	6300
Ход ползуна, мм	50	60	65	70	80	100
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	10—90	26—75	26—75	60	60	50
Наибольшее расстояние между столом и ползуном, мм	190	380	360	450	460	500
Размеры стола, мм	300××300	420××420	520××820	650××610	810××770	930××890
Наибольшие размеры материала, мм:						
толщина	6	—	—	14	16	16
ширина	125	180	190	250	360	450
Мощность привода, кВт	7,88	20	25	43	71	85
Масса, т	5,2	8,7	12,2	14,8	21,4	31,6

23. Основные параметры молотов листоштамповочных воздушных

Параметр	Нормы			
Масса верхнего штампа, кг	800	1600	3150	5000
Номинальная масса падающих частей, кг	686	1200	2820	9320
Наибольший рабочий ход бабы, мм	800	1000	1200	1500
Рабочие размеры стола, мм	900×700	1200×900	1700×1200	3100×1800
Масса, т	13,8	20,5	44,3	121

24. Основные параметры ножниц высечных (ГОСТ 16829—71)

Параметр	Нормы		
Наибольшая толщина разрезаемого листа, мм	4,0	6,3	10
Наибольшее расстояние от кромки верхнего ножа до станины (вылет), мм	1000	1250	1250
Частота ходов ножа, мин$^{-1}$	510; 1000; 2000	500; 1000; 2000	200; 300; 400; 600
Мощность привода, кВт	1,1; 1,5	3,3; 4,1	4; 4,5; 5,2
Масса, т	0,82	2,09	3,33

25. Основные параметры ножниц листовых двухдисковых с наклонными ножами (ГОСТ 8249—84Е)

Параметр	Нормы				
Наибольшая толщина разрезаемого материала ($\sigma_в \leqslant 500$ МПа), мм	2,5	4,0	6,3	10	16
Наибольшая толщина материала при гибке и отбортовке, мм	2	3	5	8	10
Расстояние от кромки ножей до станины (вылет), мм	1000	1000	1000	1000	1250
Скорость обработки, м/мин:					
наибольшая, не менее	10	10	10	10	6,0
наименьшая, не более	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0
Мощность привода, кВт	0,69; 1,1; 1,5	1,0; 1,3; 1,7	3,8; 6,3	4,25;	—
Масса, т	1,12	1,84	2,87	5,76	—

26. Основные параметры обрабатывающих центров на базе прессов координатно-револьверных с ЧПУ

Параметр	Обрабатывающий центр	
	с режимом высечки, фрезерования и резьбонарезания	с лазерной технологической установкой
Номинальное усилие, кН	400	400
Частота ходов ползуна, мин$^{-1}$	150; 300	140
Наибольший диаметр пробиваемого отверстия, мм	90	90
Число позиций инструмента	28	28
Мощность привода, кВт	4,2; 7,1	49; 71
Масса, т	12,7	17

27. Основные параметры прессов листогибочных кривошипных (ГОСТ 7879—79)

Параметр	Нормы				
Номинальное усилие, кН	630	1000	1000	1600	2500
Ход ползуна, мм	80	80	80	100	100
Расстояние от оси ползуна до станины (вылет), мм	250	250	250	320	320
Частота ходов ползуна, $мин^{-1}$	35—10	10—40	10—40	10—32	10—32
Размеры стола, мм	2500×160	2500×200	4000×200	3150×250	3150×320
Мощность привода, кВт	7,5	11 8	13,5	13,5	27
Масса, т	7,4	9,3	10,8	19,4	33,8

28. Основные параметры прессов листогибочных гидравлических (ГОСТ 10560—83)

Параметр	Нормы						
Номинальное усилие, кН	630	1000	1000	1600	2500	4000	6300
Ход ползуна, мм	125	190	190	210	210	320	320
Расстояние от оси ползуна до станины (вылет), мм	250	250	250	320	320	400	400
Скорость ползуна, мм/с:							
при рабочем ходе	12	15	15	12,5	12,5	12	8
при возвратном ходе	70	65	65	60	60	60	60
при холостом ходе	100	100	100	100	100	100	80
Размеры стола, мм	2500×125	2500×200	4000×200	5000×250	5000×320	6300×320	8000×400
Мощность привода, кВт	—	11	11	15	22	37	45
Масса, т	—	6,85	8,4	15,0	26,2	40,5	—

29. Основные параметры прессов листогибочных гидравлических с ЧПУ (ГОСТ 10560—83)

Параметр	Нормы					
Номинальное усилие, кН	1000	1000	1600	2500	4000	6300
Ход ползуна, мм	190	210	210	210	360	—
Расстояние от оси ползуна до станины (вылет), мм	250	250	320	320	400	—
Скорость ползуна, мм/с:						
при рабочем ходе	13,5	12,5	12,5	10	12	—
при возвратном ходе	65	65	60	60	60	—
при холостом ходе	100	100	100	100	100	—
Размеры стола, мм	2500×200	4000×200	5000×250	5000×320	6300×400	8000×400
Мощность привода, кВт	7,5	7,5	11	15	37	—
Масса, т	7,2	10,6	18,2	24,4	41,6	—

30. Основные параметры машин листогибочных с поворотной гибочной балкой (ГОСТ 16509—84)

Параметр	Нормы				
Ширина изгибаемого листа, мм, не более	1600	2000	2500	3200	4000
Толщина изгибаемого листа при наибольшей ширине, мм	6,0	5,0	4,5	4,0	3,5
Угол поворота гибочной балки, град, не более	180				
Ход прижимной балки, мм	250				
Скорость поворота гибочной балки, град/с	38				
Величина регулировки гибочной балки, мм	100				
Мощность привода, кВт	10,07				
Масса, т	5,33	5,68	6,46	8,0	9,5

31. Основные параметры машин листогибочных с поворотной гибочной балкой и ЧПУ (ГОСТ 24612—81Е)

Параметр	Нормы				
Ширина изгибаемого листа, мм, не более	1600	2000	2500	3200	4000
Толщина изгибаемого листа при наибольшей ширине, мм	6,0	5,0	4,5	4,0	3,5
Угол поворота гибочной балки, град, не более	180				
Ход прижимной балки, мм	250				
Скорость поворота гибочной балки, град/с	38				
Величина регулировки гибочной балки, мм	100				
Мощность привода, кВт	9,7				
Масса, т	5,43	5,78	6,94	8,3	9,8

Прессы листогибочные гидравлические (табл. 28) предназначены для изготовления различных деталей методом гибки из листового и полосового проката. По заказу потребителя прессы комплектуют средствами механизации.

Прессы листогибочные гидравлические с числовым программным управлением (табл. 29) предназначены для многоколенной гибки деталей из листового и полосового проката. По заказу потребителя прессы комплектуют средствами механизации.

Прессы гибочно-штамповочные горизонтальные предназначены для горячей и холодной гибки — штамповки деталей из штучных заготовок (полосы, уголки, круги, квадраты и другой сортовой прокат). Основные параметры этих прессов приведены в т. 1, с. 309.

Машины листогибочные с поворотной балкой (табл. 30) предназначены для изготовления деталей методом хо-

32. Основные параметры машин листогибочных с поворотными прижимной и гибочной балками с ЧПУ

Параметр	Нормы				
Наибольшая ширина изгибаемого листа, мм	1600	2000	2500	3200	4000
Наибольшая толщина изгибаемого листа, мм	6	5	4,5	4,0	3,5
Угол поворота балки, град			120		
Наибольший ход прижимной балки, мм			250		
Наибольший угол поворота гибочной балки, град			180		
Скорость поворота гибочной балки, град/с			30		
Мощность привода, кВт			10,5		
Масса, т	6,1	6,4	7,7	8,7	10,2

33. Основные параметры машин листогибочных трехвалковых (ГОСТ 10664—82)

Параметр	Нормы					
Наибольшая ширина изгибаемого листа, мм	1250	1250	2000	2000	2000	2000
Наибольшая толщина изгибаемого листа, мм	2,0	5,0	1,6	4,0	10	16
Наименьший радиус гибки, мм	67	125	85	125	180	240
Диаметр верхнего валка, мм	100	180	125	180	215	270
Скорость гибки, м/мин	10,8	—	10,8	10,8	9,3	7,7
Мощность привода, кВт	1,7	—	1,7	6,3	8,5	12
Масса, т	1,1	—	1,2	3,1	6,2	10,72

Параметр	Нормы					
Наибольшая ширина изгибаемого листа, мм	2510	3150	3150	3150	3150	3150
Наибольшая толщина изгибаемого листа, мм	9	8	13	25	25	40
Наименьший радиус гибки, мм	180	180	240	340	380	600
Диаметр верхнего валка, мм	240	240	310	500	450	600
Скорость гибки, м/мин	—	10,2	—	7,0	3; 4,5; 6; 7	—
Мощность привода, кВт	—	8,5	—	38	37	—
Масса, т	—	8,0	—	54	26	—

34. Основные параметры машин листогибочных четырехвалковых (ГОСТ 10664—82)

Параметр	Нормы		
Наибольшая ширина изгибаемого листа, мм	2500	3150	3150
Наибольшая толщина изгибаемого листа, мм	28	25	40
Наименьший радиус гибки, мм	380	380	600
Диаметр верхнего валка, мм	500	500	600
Скорость гибки, м/мин	7,5	7,5	6,5
Мощность привода, кВт	37	37	60
Масса, т	41,2	58,0	58,0

35. Основные параметры машин листогибочных четырехвалковых с ЧПУ

Параметр	Нормы					
Наибольшая ширина изгибаемого листа, мм	2000	2000	2000	2500	3150	3150
Наибольшая толщина изгибаемого листа, мм	4	10	16	28	25	40
Наименьший радиус гибки, мм	150	—	—	380	—	—
Скорость гибки, м/мин	6—10	—	—	7,5	—	—
Мощность привода, кВт	5,5	—	—	37	—	—
Масса, т	5,2	—	—	26	—	—

лодной гибки из листового и полосового материала. По заказу потребителя машины комплектуют приспособлениями для различных видов гибки и оправками для гибки коробок, П-образных заготовок и кромок; оснащают средствами механизации загрузки листа и съема готовых деталей с приемного стола.

Машины листогибочные с поворотной гибочной балкой и числовым программным управлением (табл. 31) предназначены для изготовления деталей методом холодной гибки из листового и полосового материала. По заказу потребителя машины поставляют со средствами механизации загрузки.

Машины листогибочные с поворотными прижимной и гибочной балками с числовым программным управлением (табл. 32) предназначены для многооперационной гибки из листового и полосового материала.

Машины листогибочные трехвалковые (табл. 33) предназначены для гибки цилиндрических и конических заготовок из листового материала. По заказу потребителя поставляют с приспособлением для гибки конических и цилиндрических заготовок с передним столом, с устройствами для съема и приемки, с устройствами для поддержки деталей диаметром до 2000 мм из материала толщиной до 8 мм; также по заказу потребителя машины для гибки заготовок из материала толщиной от 4 до 16 мм поставляют с инструментом для гибки уголков, полос, труб, швеллеров.

Машины листогибочные четырехвалковые (табл. 34) предназначены для гибки цилиндрических и конических заготовок из листового материала. По заказу потребителя машины поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе

36. Основные параметры машин двухроликовых с горизонтальными шпинделями для резки и гибки

Параметр	Нормы				
Наибольшая толщина материала ($\sigma_в = 250$ МПа) при зиговке, мм	1,6	1 6	2,5	2,5	4,0
Наибольшая толщина разрезаемого материала ($\sigma_в = 500$ МПа), мм	2,5	2,5	4	4	6,3
Наибольшая толщина материала ($\sigma_в = 500$ МПа) при гибке и отбортовке, мм	1,6	1,6	2,5	2,5	4,0
Расстояние от оси шпинделя до станины, мм	315	630	400	800	500
Скорость обработки, м/мин	4—12	4—12	2,7—16,8	4—12	3,3—17
Мощность привода, кВт	—	—	2,2; 3,6	2,2; 3,6	3,2; 5,3
Масса, т	0,8	0,85	1,1	1,3	1,5

37. Основные параметры машин трубогибочных с механическим приводом (ГОСТ 11186—75)

Параметр	Нормы			
Наибольший наружный диаметр изгибаемой трубы, мм	63	63	100	100
Наибольшая толщина стенки изгибаемой трубы, мм	4	4	5	6
Наибольшая длина изгибаемой трубы, мм	3000	3000	3000	4000
Наибольший радиус гибочного сектора (внутренний), мм	320	320	500	800
Угол поворота гибочного сектора, град	210			
Расстояние от оси гибочного сектора до места крепления конца оправки, мм	3000	3000	3000	4000
Мощность привода, кВт	4,2; 7,1	6,3	13; 18	13,5; 19,5
Масса, т	1,5	1,2	3,7	5,8

38. Машины трубогибочные с гидравлическим приводом (ГОСТ 11186—75)

Параметр	Нормы		
Наибольший наружный диаметр изгибаемой трубы, мм	63	100	250
Наибольшая толщина стенки изгибаемой трубы, мм	4	5	16
Наибольшая длина изгибаемой трубы, мм	6000	6000	7000
Наибольший радиус гибочного сектора (внутренний), мм	320	500	1300
Угол поворота гибочного сектора, град	210	210	200
Мощность привода, кВт	10	17	56,1
Масса, т	2,5	5,42	21,7

39. Основные параметры машин трубогибочных с программным управлением

Параметр	Нормы		
Наибольший наружный диаметр изгибаемой трубы, мм	20	63	100
Наибольшая толщина стенки изгибаемой трубы, мм	—	4,0	5,0
Наибольшая длина изгибаемой трубы, мм	2700	6000	6000
Наибольший радиус гибочного сектора, мм	150	320	500
Угол поворота гибочного сектора, град	180	180	210
Мощность привода, кВт	—	11	17
Масса, т	2,29	4,27	8

40. Основные параметры машин для гибки с растяжением

Параметр	Нормы		
Наибольшее усилие растяжения, кН	100	250	600
Длина обрабатываемой заготовки, мм:			
наибольшая	5500	6000	9000
наименьшая	1000	1000	2000
Наибольший угол изгиба заготовки, град	180	220	200
Наибольшее давление в гидросистеме, МПа	6,5	13	12
Наибольшее усилие прижимного цилиндра, кН	—	250	400
Мощность привода, кВт	14	61,7	69,5
Масса, т	6,43	21	55

41. Основные параметры обтяжных машин

Параметр	Нормы	
Наибольшие размеры обрабатываемой заготовки, мм:		
длина	4000	3000
толщина	2	2
Наибольшее усилие обжатия, кН	600	—
Наибольшее усилие, развиваемое столом, кН	—	3000
Вертикальный ход траверсы:		
правой	375	—
левой	200	—
Вертикальный ход стола, мм	—	350
Наклон стола в вертикальной плоскости, град	—	До 10

Продолжение табл. 41

Параметр	Нормы	
Расстояние между зажимными губками в вертикальном положении, мм:		
наименьшее	140	600
наибольшее	600	1950
Наибольший угол разворота зажимов в плане, град	4	16
Мощность привода, кВт	34,8	26,4
Масса, т	55	40

комплексов оборудования; комплектуют приспособлением для гибки коиусов.

Машины листогибочные четырехвалковые с числовым программным управлением (табл. 35) предназначены для гибки цилиндрических и конических обечаек из листового материала в холодном и горячем состоянии.

По заказу потребителя машины комплектуют приспособлением для гибки конических обечаек; механизмом съема деталей; передним столом; механизмом поддержки обечайки; приемным роликовым конвейером.

Машины для резки и гибки двухролнковые с горизонтальными шпинделями (табл. 36) предназначены для зиговки, гибки, отбортовки, рифления, прямой и круговой резки листового материала. По заказу потребителя машины комплектуют приспособлениями для обработки кругов диаметром до 1000 мм и выше; гибки обечаек; программирования полос; обработки деталей типа труб; для навивки пружин; стоечным роликовым конвейером.

Машины трубогибочные с механическим приводом (табл. 37) предназначены для холодной гибки труб с оправкой и без оправки методом наматывании трубы на инструмент. По заказу потребителя машины поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплексов оборудования и с механизмом поштучной выдачи труб.

Машины трубогибочные с гидравлическим приводом (табл. 38) предназначены для холодной гибки труб с оправкой и без оправки методом наматывания трубы на инструмент. По заказу потребителя машины поставляют со средствами механизации и автоматизации, а также в составе комплекса оборудования.

Машины трубогибочные с программным управлением (табл. 39) предназначены для гибки труб в холодном состоянии с оправкой и без оправки.

Машины для гибки с растяжением (табл. 40) предназначены для изготовления различных профильных деталей. Весь процесс работы машины автоматизирован.

Машины обтижные (табл. 41) предназначены для штамповки деталей из листового материала с большим радиусом кривизны стенки с утонением.

Глава 21 ВЫБОР ЛИСТОШТАМПОВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Общие принципы выбора оборудования. Для листовой штамповки применяют кривошипные машины и автоматы, гидравлические и винтовые прессы, паровоздушные молоты, высокоскоростные машины импульсного действия.

Машина для осуществления заданного технологического процесса листовой штамповки должна отвечать следующим требованиям: 1) иметь в своей структуре столько исполнительных механизмов, сколько требуется для обеспечения необходимых манипуляций над заготовкой; 2) обладать необходимым запасом энергии привода и развивать усилие, необходимое для деформирования заготовки; 3) иметь соответствующие скоростные параметры; 4) иметь необходимые размеры штампового пространства; 5) величина хода рабочих органов (ползуна, поперечины, бабы и др.) должна быть достаточной; 6) обеспечивать требуемую точность штамповки; 7) иметь необходимые размеры элементов крепления; 8) отвечать серийности производства; 9) не оказывать вредного воздействия на человека, окружающую среду, строения и оборудование.

Подавляющая часть листоштамповочного оборудования является машинами простого действия с одним главным исполнительным органом. На таких машинах осуществляют технологические процессы, не требующие специальных рабочих органов для прижима заготовки, ее подпора или выталкивания, транспортирования по позициям и т. д.

При вытяжке средне- и крупногабаритных деталей из листовой стали необходимо обеспечить прижим заготовки по большой площади, поэтому в этом случае применяют прессы двойного или тройного действия. Небольшие по габаритам детали можно вытягивать на прессах простого действия, оборудованных прижимными подушками различной конструкции.

При выполнении операций чистовой вырубки заготовку прижимают клиновым ребром, фиксируют ее снизу контрпуансоном и осуществляют вырубку; при этом необходимо три исполнительных органа, совершающих движения согласно циклограмме.

Транспортирование заготовки в штамп и по позициям осуществляют с помощью внешних устройств (валковые, клещевые и другие подачи для полосового или рулонного материала), пристроенных к машине или встроенных в штамп, а также с помощью структурных механизмов самой машины (те же подачи, грейферные перекладчики и т. д.).

В дыропробивных прессах-автоматах инструмент на рабочую позицию перемещается с помощью револьверной головки, а заготовка перемещается по программе двумя каретками по двум координатам.

При пластическом деформировании заготовки уровень накопленной энергии в приводе должен соответствовать требуемому расходу энергии непосредственно на деформирование с учетом потерь на трение, упругую деформацию машины и др.

Характер изменения сил сопротивления деформированию зависит от вида напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала на данной технологической операции — разделительной или формообразующей по своему типу. При этом, если сила, развиваемая машиной, недостаточна, то процесс пластического деформирования или не начнется, или не будет доведен до конца. С другой стороны, силы сопротивления деформированию не должны превышать допускаемых нагрузок по прочности машины; в противном случае возможна поломка машины.

Скоростные параметры оборудования определяются требованиями к скоростному режиму деформирования: по максимально допустимой скорости $v_{д\,max}$, чтобы не превысить запаса пластичности (например, при вытяжке низкоуглеродистых сталей $v_{д\,max} < 0{,}3$ м/с), или по минимально допустимой $v_{д\,min}$, чтобы создать условия, при которых достигаются наиболее высокие показатели пластичности (например, при вытяжке некоторых малопластичных сплавов).

Требования 4, 5 и 7 к машинам (см. выше) определяют линейные технологические параметры, направлены на осуществление возможности размещения штампов и средств автоматизации в рабочем пространстве машины, совершения заданного рабочего хода и последующего извлечения заготовки из штампа и, наконец, крепления штампа (инструмента) к исполнительному органу.

Точность движения исполнительного органа и прикрепленного к нему штампа (инструмента) во многом определяет качество штампованных деталей. Опыт показывает, что указанная точность зависит от особенностей конструктивного устройства машины и ее упругой податливости под действием деформирующей силы: чем больше податливость, особенно в плоскости, перпендикулярной к движению штампа, тем ниже точность штамповки. Поэтому для штамповки деталей повышенной точности целесообразно выбирать более жесткие машины, например, вместо кривошипного пресса открытого типа применить пресс закрытого типа; стойкость рабочих частей инструмента при этом существенно повышается.

Выбор типа машины в зависимости от серийности производства традиционно решается так: в крупносерийном и массовом производстве деталей применяют универсальные, специализированные и специальные машины с автоматизированным технологическим циклом; в мелкосерийном и серийном производстве — универсальные и специализированные машины с частично автоматизированным или механизированным технологическим циклом.

Благодаря автоматизации управления складами (магазинами) исходного металла, штампов, готовых деталей, а также наладочными движениями исполнительных органов кузнечно-прессовых машин и средств транспортирования в настоящее время широко внедряются гибкие производственные системы — ГПС (или гибкие автоматизированные производства — ГАП). Это штамповочные центры, в составе которых в качестве базовой установлена та или иная кузнечно-прессовая машина с автоматизированным технологическим циклом. Подобного рода штамповочные центры рентабельны даже в условиях мелкосерийного производства.

В единичном или мелкосерийном производстве применяют штамповку на специальном оборудовании с упрощенной штамповой оснасткой (штамповка полиуретаном, жидкостью в условиях гидростатики, взрывом и др.).

Особенности силового режима штамповки существенным образом влияют на механическое состояние кузнечно-прессовой машины. Например, в деталях машины могут возникнуть напряжения, превышающие допускаемые при данном положении исполнительного механизма, или внезапный спад технологической нагрузки при выполнении разделительной операции может настолько возбудить конструкцию машины, что появившиеся в ней динамические нагрузки резко снизят надежность машины, а могут вызвать и разрушение ее соединений. Машина в этом случае становится источником интенсивных колебаний, неблагоприятно влияющих на окружающую среду и человека.

Экологически неблагоприятное воздействие (шумовое) машины может наблюдаться при высоких частотах вспомогательных ходов исполнительного органа или при его высокой скорости в момент рабочего хода. Радикальное решение проблемы состоит в установке машины на упругих амортизаторах в изолированной камере.

В каталогах кузнечно-прессовые машины расположены по возрастанию главных параметров, совокупность которых определяет выбор конкретной машины для осуществления заданного технологического процесса.

Для машин статического действия, характеризующихся малыми скоростями исполнительного органа в начале рабочего хода ($v_{н.\,р} < 1$ м/с), главным параметром является номинальное усилие $P_н$; для специальных машин вместо номинального усилия принято указывать габаритный размер исходного материала или деталей, которые можно изготовить на данной машине.

Для машин ударного действия главным параметром является кинетическая энергия $L_э$, накопленная движущимися частями к началу рабочего хода, или масса m этих частей.

Основные паспортные данные на машину включают: подачу S_{max} исполнительного органа, мм; номинальную частоту ходов исполнительного органа в минуту; закрытую высоту $H_з$ штампового пространства и величину ее регулирования $H_{рег}$, мм; размеры исполнительного органа и стола (подштамповой плиты) в плане, мм; размеры мест крепления, мм; усилие $P_п$ и подачу $S_п$ подушки и др. Для характеристики эксплуатационных возможностей кривошипных машин в паспортах также приводятся: графики усилий P_D, допускаемых прочностью валов и зубчатых передач, по ходу S ползунов; графики допустимой работы $A_ф$ пластического формоизменения в зависимости от коэффициента k_i использования ходов.

Исходные данные для выбора листоштамповочной машины. Для обоснованного выбора машины необходимо иметь следующие данные, взятые из технологической и конструкторской документации:

вид и последовательность операций, осуществляемых на данной машине, — для выбора типа машины и уровня ее автоматизации; $u_р$ — перемещение инструмента в период рабочего хода; холостой перебег $u_з$ (захождение) рабочих частей инструмента при прямой подаче после окончания рабочего хода до крайнего нижнего положения (к. н. п.); максимальное усилие $P_ф$ или полная работа $A_ф$ пластического формоизменения — для определения размера машины;

усилие $P_п$ и ход подушки $S_п$;

усилие $P_в$ и ход выталкивателя $S_в$;

вид заготовки (лист, полоса, рулон, штучная заготовка), ее размеры и свойства;

размеры штампа: закрытая $H_{шт}$ и открытая $H_{отк}$ высоты и габаритные размеры в плане $A_{шт} \times B_{шт}$;

размеры съемника.

Графики усилий пластического формоизменения и работа деформации. Технологическое усилие. Непосредственно на рабочие части инструмента (пуансон, матрицу, штамп) действует сопротивление со стороны обрабатываемого материала — усилие $P_ф$ пластического формоизменения, изменяющееся при перемещении u инструмента. Зависимость $P_ф(u)$ может быть рассчитана по формулам теории обработки давлением или задана в виде аналитической аппроксимации экспериментальных графиков. Последний способ широко применяют при выборе кузнечно-прессовых машин.

1. График усилий вырубки — пробивки скошенным пуансоном приведен на рис. 1, *а*. Его аналитическая аппроксимация следующая:

$$P_ф = P'_{выр}\,\xi_1 \sin\frac{\pi n}{2s} + \xi_2 P''_{выр}, \qquad (1)$$

где $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = 0$ при $u < u_1$;
$\xi_2 = 1$, $\xi_1 = 0$ при $u_1 < u < u_{max}$.

Усилия вырубки — пробивки — максимальное $P'_{выр}$ и постоянное $P''_{выр}$ на втором этапе процесса, полное перемещение инструмента u_{max} и захождение $u_з$ — берутся из технологических расчетов. Величина перемещения u_1 пуансона на 1-м этапе равна

$$u_1 = 2s\,[1 - (\arcsin P''_{выр}/P'_{выр})/\pi], \qquad (2)$$

где s — толщина исходной листовой заготовки.

Работа деформации $A_ф$ при вырубке — пробивке скошенным пуансоном определяется как площадь под аппроксимирующим графиком:

$$A_ф = 2P'_{выр}s\,(1 - \cos\pi u_1/2s)/\pi + P''_{выр}\,(u_{max} - u_1). \qquad (3)$$

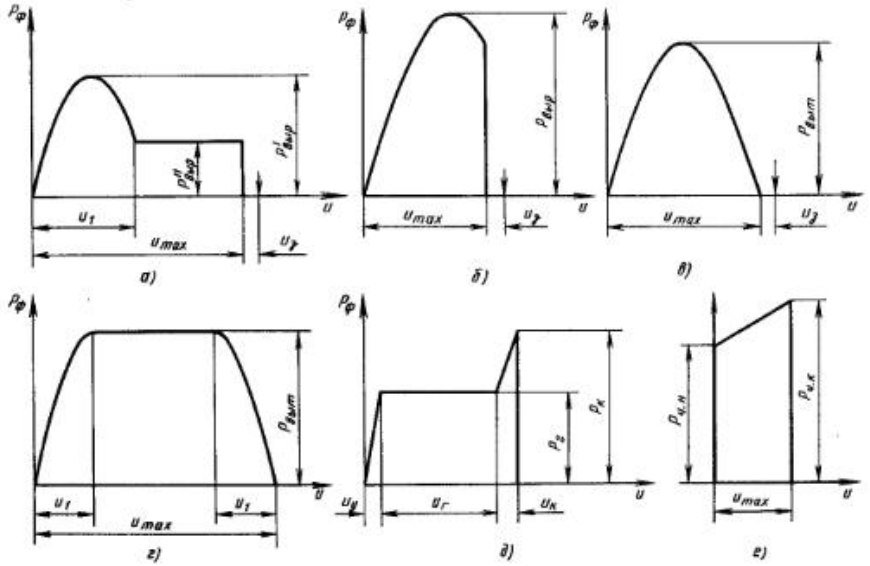


Рис. 1. Графики усилий пластического формоизменения

2. На рис. 1, *б* приведен график усилий вырубки — пробивки пуансоном без скоса. Его аналитическая аппроксимация

$$P_{\Phi} = P_{\text{выр}} \sin \frac{0{,}675\pi}{u_{\max}} u. \qquad (4)$$

Максимальное усилие вырубки — пробивки $P_{\text{выр}}$ и захождение пуансона $u_{\text{з}}$ берутся из технологических расчетов. Полный ход пуансона

$$u_{\max} = Ks, \qquad (5)$$

где $K = 0{,}4 \div 0{,}6$; причем меньшие значения K задают для более твердых материалов.

Работа деформации при вырубке—пробивке

$$A_{\Phi} = 0{,}72 P_{\text{выр}} u_{\max}. \qquad (6)$$

3. График усилий первой вытяжки (рис. 1, *в*):

$$P_{\Phi} = P_{\text{выт}} \sin \frac{\pi u}{u_{\max}}. \qquad (7)$$

Максимальное усилие первой вытяжки $P_{\text{выт}}$, полный ход пуансона $u_{\max}$ и его ход $u_{\text{з}}$ до крайнего положения после окончания вытяжки берутся из технологических расчетов.

Работа деформации при первой вытяжке

$$A_{\Phi} = 0{,}64 P_{\text{выт}} u_{\max}. \qquad (8)$$

Аналогичио задают график усилий отбортовки $P_{\Phi}(u)$ и определяют работу деформации A_{Φ}.

4. График усилий второй и последующей вытяжки (рис. 1, *г*):

$$P_{\Phi} = P_{\text{выт}} \left(\xi_1 \sin \frac{2\pi u}{u_{\max}} + \right.$$

$$\left. + \xi_2 + \xi_3 \sin 2\pi \frac{u - 0{,}5 u_{\max}}{u_{\max}} \right), \qquad (9)$$

где $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = \xi_3 = 0$ при $u \leqslant u_1 = 0{,}25 u_{\max}$; $\xi_2 = 1$, $\xi_1 = \xi_3 = 0$ при $u_1 < u \leqslant 0{,}75 u_{\max}$; $\xi_3 = 1$, $\xi_1 = \xi_2 = 0$ при $u > 0{,}75 u_{\max}$.

Максимальное усилие последующей вытяжки $P_{\text{выт}}$ и полный ход пуансона $u_{\max}$ берутся из технологических расчетов.

Работа деформации при последующей вытяжке

$$A_{\Phi} = 0{,}818 P_{\text{выт}} u_{\max}. \qquad (10)$$

5. График усилий одноугловой гибки с правкой или без правки (рис. 1, *д*). При гибке с правкой

$$P_{\Phi} = \left(\xi_1 \frac{u}{u_{\text{у}}} + \xi_2 \right) P_{\text{г}} + \xi_3 \left[P_{\text{г}} + \right.$$

$$\left. + (P_{\text{к}} - P_{\text{г}}) \frac{u - (u_{\max} + u_{\text{у}})}{u_{\text{к}}} \right], \qquad (11)$$

где $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = \xi_3 = 0$ при $u \leqslant u_{\text{у}}$; $\xi_2 = 1$, $\xi_1 = \xi_3 = 0$ при $u_{\text{у}} < u \leqslant u_{\max} + u_{\text{у}}$; $\xi_3 = 1$, $\xi_1 = \xi_2 = 0$ при $u > u_{\max} + u_{\text{у}}$.

Максимальные усилия гибки $P_{\text{г}}$ и правки $P_{\text{к}}$, ход пуансона при упругом изгибе $u_{\text{у}}$, полный ход пуансона при пластическом гибе $u_{\max}$ и при пластической правке $u_{\text{к}}$ берутся из технологических расчетов.

Работа деформации при гибке с правкой

$$A_{\Phi} = \left(\frac{1}{2} u_{\text{у}} + u_{\max} + \frac{1}{2} u_{\text{к}} \right) P_{\text{г}} +$$

$$+ \frac{1}{2} P_{\text{к}} u_{\text{к}}. \qquad (12)$$

При гибке без правки график усилий пластического формоизменения $P_{\Phi}(u)$ характеризуется только первыми двумя участками на рис. 1, *д*, а его функция первым членом суммы в уравнении (11) при $\xi_3 = 0$.

При определении работы деформации A_{Φ} для гибки без правки следует иметь в виду, что $u_{\text{к}} = 0$.

6. График усилий чеканки, калибровки, правки (рис. 1, *е*):

$$P_{\Phi} = P_{\text{ч. н}} + (P_{\text{ч. к}} - P_{\text{с. н}}) \frac{u}{u_{\max}}. \qquad (13)$$

Начальное $P_{\text{ч. н}}$ и конечное (максимальное) $P_{\text{ч. к}}$ усилия чеканки, калибровки, правки и полный ход пуансона $u_{\max}$ берутся из технологических расчетов.

Работа деформации при чеканке, калибровке, правке

$$A_{\Phi} = 0{,}5 (P_{\text{ч. н}} + P_{\text{ч. к}}) u_{\max}. \qquad (14)$$

При выполнении вытяжки на прессах, не имеющих прижимных ползунов, — листоштамповочные прессы простого действия, многопозиционные прессы-автоматы со встроенными пневмо- или гидропневматическими прижимными подушками — при рабочем ходе главного ползуна преодолевается сопротивление $P_{\text{п}}$ указаниых подушек. В ряде случаев (вытяжка, гибка) необходимо преодолеть сопротивление $P_{\text{в}}$ встроенного выталкивателя. Системы современных прессов устроены так, что усилия $P_{\text{п}}$ и $P_{\text{в}}$ в период рабочего хода измеияются незначительно, и поэтому в расчетах их можно принять постоянными.

Сопротивление движению пуансона включает не только усилие пластического формоизменения P_{Φ}, но и усилия прижима $P_{\text{п}}$ и выталкивателя $P_{\text{в}}$. Поэтому технологическое усилие $P_{\text{т}}$ необходимое для выполнения технологической операции, в общем случае

$$P_{\text{т}} = P_{\Phi} + P_{\text{п}} + P_{\text{в}}. \qquad (15)$$

Графическая интерпретация уравиения (15) означает, что график усилий пластического формоизменения $P_{\Phi}(u)$ должен быть поднят на величину $P_{\text{п}}(u) + P_{\text{в}}(u) = \text{const}$, т. е.

$$P_{\text{т}}(u) = P_{\Phi}(u) + P_{\text{п}}(u) + P_{\text{в}}(u). \qquad (16)$$

Если прижим и выталкивание отсутствуют, то

$$P_{\text{т}}(u) = P_{\Phi}(u). \qquad (17)$$

Графики усилий многопозициоиной штамповки. Суммарный график технологических усилий $P_{\text{с. т}}(u)$ одновременной штамповки иа нескольких позициях за один рабочий ход исполнительного органа получают сложением элементарных графиков $P_{\text{т}}(u)$ для отдельных операций. Дли примера на рис. 2 приведены элементарные и суммарный графики усилий для многопозициоиной штамповки: первая вытяжка (с прижимом) + вторая вытяжка (с прижимом) + калибровка фланца + пробивка отверстий во фланце + вырубка по контуру.

Параметры элементарных графиков берутси из технологических расчетов.

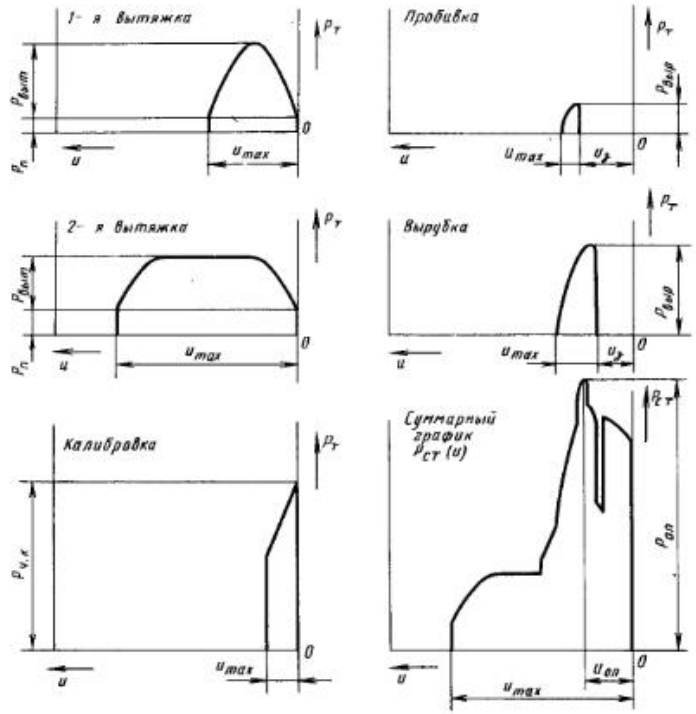


Рис. 2. Графики усилий пластического формоизменения при многопозиционной штамповке ($u_{оп}$ — ход инструмента, при котором достигается опасное для прочности пресса усилие $P_{оп}$)

При сложении элементарных графиков обязательно соблюдение правила «точки отсчета». Для операций без холостого перебега инструмента за точку отсчета принимается крайнее (нижнее, верхнее, переднее) положение исполнительного органа, от него влево откладывают u_{max} и слева направо стронтся график усилнй. Для операций с холостым перебегом (захождением) инструмента (операции вырубки и пробивкн всегда, а также вытяжки и гибкн напроход) от крайнего положения откладывается влево захождение $u_з$, а уже строится график усилий.

Выбор кривошипных листовых ножнц с наклонными ножами. Каталожные данные содержат прямые указания о возможности применения кривошипных листовых ножниц: номинальную толщину $s_н$ (мм) разрезаемого листа при пределе прочности матернала $\sigma_в = 500$ МПа и наибольшую ширнну листа L (мм).

Еслн металл характернзуется показателем прочностн $\sigma_в'$, то на данных ножницах можно разрезать лист толщиной

$$s_1 = s_н\sigma_в/\sigma_в'. \qquad (18)$$

Выбор кривошипных прессов и автоматов. *Выбор по линейным технологическим параметрам.* Для размещения штампов, осуществления подачи заготовки и удаления детали кривошипный пресс или автомат должен иметь: достаточную величину полного хода S_{max} ползуна; необходимые размеры стола пресса и ползуна в плане и элементов крепления; достаточную закрытую высоту штампового пространства.

Величину полного хода ползуна S_{max} кривошнпных прессов для вытяжки определяют исходя из удобства установкн заготовкн и удаления готовой деталн прнмерно в 2—3 больше глубины вытяжки. Такое же правило следует соблюдать н прн задании S_{max} для операцнн гибки. Прн вырубке — пробивке необходимо обеспечнть съем металла — деталей нлн отхода — с пуансона, поэтому достаточно, чтобы S_{max} превышал на 5—10 мм зазор между съемником и матрицей.

Аналитический расчет S_{max} можно выполннть по формуле

$$S_{max} \approx 2(S_р + u_з)/(1 - \cos\alpha_{н.р}), \quad (19)$$

где $S_р$ — рабочий ход ползуна с учетом упругой податливости пресса;

$$S_р = u_{max} + \Delta S_у; \qquad (20)$$

u_{max} — полный ход инструмента прн пластическом формоизменении; $\Delta S_у$ — дополнительное перемещение ползуна, компенсирующее упругую податливость пресса (табл. 1); $u_в$ — перебег инструмента (захождение); $\alpha_{н.р}$ — угол начала рабочего хода (см. табл. 1).

Проверку правнльностн определения S_{max} производят по выполненню следующих условий: возможностн нзвлечения детали из штампов для операцнй, на которых получают деталн с высотой, превосходящей высоту (толщину) исходной заготовки; возможностн размещения средств механизации и автоматизации.

Полученное расчетное значенне S_{max} округляют в большую сторону до значений хода ползуна прнятого типа пресса по каталожным данным.

В зависимости от габаритов штампов по каталожным данным выбнрают одно-, двух- или четырехкривошнпиый пресс с необходимыми размерами штампового пространства. При этом может возникнуть необходимость в корректнровке величины S_{max}, еслн решающим фактором окажется не величина рабочего хода, а габариты штампов.

Выбор по усилию. Главные валы и зубчатые передачи кривошипных прессов неравнопрочны при различных положениях ползуна: с уменьшением недохода S ползуна до крайнего положения усилие P_D, допускаемое прочностью указанных деталей, возрастает и прн достижении номнального недохода $S_н$ составляет номинальную велнчину $P_н$. Поэтому по условию надежности пресса не разрешается превышение графиком технологических усилий $P_т(u)$ графика допускаемых усилий $P_D(S)$: первый график должен расположнться ниже второго, как это показано на рис. 3.

Величина недохода ползуна $S_{оп}$, при котором возникает опасность нарушения прочности пресса при совершении данной технологической операции, устанавливается по зависимостям $P_т(u)$ (см. рис. 3) с учетом перебега инструмента $u_з$ и упругой деформации Δl (табл. 2).

По условию надежности пресса должно соблюдаться следующее соотношение: опасное технологическое усилие

1. Углы начала рабочего хода $\alpha_{н.р}$ и дополнительное перемещение ползуна $\Delta S_у$

Операция	$\alpha^\circ_{н.р}$	$\Delta S_у$
Вырубка — пробивка:		
скошенным пуансоном	25—30	$P'_{выр}/c_п$
прямым пуансоном	15—25	$0{,}85P_{выр}/c_п$
Вытяжка на прессе:		
простого действия	45—60	—
двойного действия	60—75	—
Гибка без правки:		$P_г/c_п$
одноугловая	35—45	$P_г/c_п$
многоугловая	40—55	$P'_г/c_п$
Гибка с правкой	30—40	$P_н/c_п$

Примечание. $c_п$ — жесткость кривошнпного пресса — автомата.

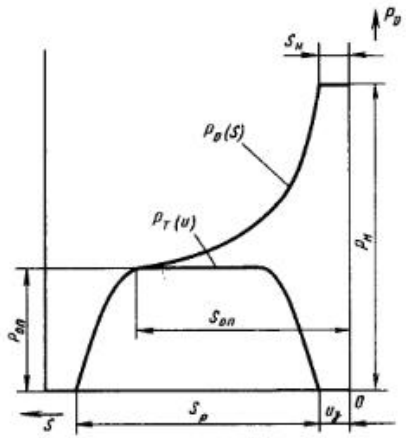


Рис. 3. Графики усилий пластического формоизменения и усилий, допускаемых прочностью пресса

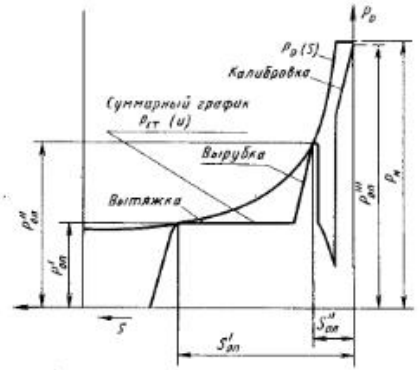


Рис. 4. Усилия деформирования при многопозиционной штамповке и усилия, допускаемые прочностью пресса

в том числе и суммарное, должно быть меньше допускаемого, т. е.

$$P_{оп}(u_{оп}) < P_D(S_{оп}). \qquad (21)$$

В некоторых операциях типа гибки с правкой при многопозиционной штамповке (рис. 4) опасность нарушения прочности пресса может возникнуть не один раз, поэтому все опасные положения требуют проверки по условию (21).

По опасному технологическому усилию $P_{оп}$ можно определить номинальное усилие $P_н$, по которому производят выбор пресса:

$$P_н = K_н K_д K_а P_{оп}, \qquad (22)$$

где $K_н$ — коэффициент нагрузки, учитывающий соотношение графиков $P_т(u)$ и $P_D(S)$; $K_д$ — коэффициент долговечности, учитывающий влияние динамических нагрузок на

2. Формулы для определения $P_{оп}$ и $S_{оп}$ для различных операций

Операция	Опасное усилие $P_{оп}$	Недоход ползуна $S_{оп}$, при котором действует $P_{оп}$	Упругая деформация Δl
Вырубка — пробивка:			
скошенным пуансоном	$P_{выр}$	$u_{max} - s + u_з$	—
прямым пуансоном	$P_{выр}$	$0{,}25u_{max} + u_з$	—
Вытяжка:			
первая вытяжка, отбортовка	$P_{выт}$	$0{,}5u_{max} + u_з$	—
вторая и последующая вытяжки	$P_{выт}$	$0{,}75u_{max} + u_з$	—
Гибка:			
без правки	$P_г$	$u_г + u_з$	—
с правкой	$P_г$	$u_г + u_н + \Delta l$	$P_г/c_п$
	$P_к$	0	—
Чеканка, калибровка, правка	$P_{ч.н}$	$u_{max}/2 + \Delta l$	$P_{ч.н}/c_п$
	$P_{ч.к}$	0	—
Многопозиционная штамповка (см. рис. 2)	$P_{с.т}$	$u_{оп} + \Delta l$	$P_{с.т}/c_п$

3. Значения $S_н$ и b для различных кривошипных прессов и автоматов

Типы кривошипных прессов и автоматов	Номинальное усилие $P_н$, МН	Ход ползуна	Номинальный недоход $S_н$, мм	Коэффициент b
Листоштамповочные простого действия				
Открытые:				
однокривошипные	0,025—0,25	Рег	$2{,}2\left(\frac{P_н}{0{,}25}\right)^{0{,}33} \times \left(\frac{S_{max\ наиб}}{S_{max}}\right)^{1{,}8}$	0,4—0,28
	0,4—2,5	Рег	$5{,}5\left(\frac{P_н}{1{,}0}\right)^{0{,}7} \times \left(\frac{S_{max\ наиб}}{S_{max}}\right)^{1{,}8}$	0,24—0,21
двухкривошипные	1—2,5	Н. П	—	—
Закрытые:				
однокривошипные	1,6—25	Н. П	12	0,12—0,16
		Ув. П	12	0,18—0,24
двухкривошипные	2,5—25	Н. П	12	0,14—0,16
		Ув. П	12	0,18—0,24
четырехкривошипные	10—63	Н. П	12	0,16—0,18
		Ув. П	12	0,18—0,24
			20	0,13—0,16
Листоштамповочные двойного действия				
Однокривошипные	0,63—8	Н. П	16	0,22—0,24
Двухкривошипные	5—8	Н. П	16	0,22—0,24
			25	0,18—0,20
Четырехкривошипные	6,3—10	Н. П	16	0,22—0,24
Специальные				
Листогибочные	0,63—4	Н	12	0,14—0,16
Чеканочные	1,6—16	Н	$(P_н/1{,}6)^{0{,}5}$	$0{,}75\ (105/S_{max})^{0{,}7}$
Автоматы листоштамповочные				
Многопозиционные	0,1—0,4	Н	5—7	0,26—0,23
	0,63—1,0	Н	8—10	0,19—0,18
	1,6—4,0	Н	12—12,5	0,18—0,17
	6,3—10	Н	15	0,18—0,17

Продолжение табл. 3

Типы кривошипных прессов и автоматов	Номинальное усилие $P_н$, МН	Ход ползуна	Номинальный недоход $S_н$, мм	Коэффициент b
С нижним приводом	0,063—2,5	Ум	$0{,}5S_{max}$	0
	0,063—0,25	Н	$2{,}8 + 6{,}44P_н^{1{,}35}$	$0{,}35 - 0{,}32P_н$
	0,4—2,5	Н	$2{,}8 + 6{,}44P_н^{1{,}35}$	$0{,}295 - 0{,}2P_н + 0{,}0832P_н^{1{,}2}$

Примечание. Обозначения: Н — нормальный; Н. П — нормальный постоянный; Рег — регулнруемый; Ув — увеличеиный; Ув. П — увеличеиный постоянный; Ум — уменьшенный.

надежность кривошипного пресса; $K_э$ — коэффициент, учитывающий эксцентричность приложения нагрузки относительно оси пресса. При центральном приложеиии нагрузки $K_э = 1$.

Коэффициент нагрузки $K_н \geqslant 1$ рассчитывают по формуле

$$K_н = \left\{ (S_{оп}/a)^{-b} e^{2bS_{оп}/S_{max}} + \left[1 - (S_н/a)^{-b} e^{2bS_н/S_{max}}\right] \times \left(\frac{0{,}5S_{max} - S_{оп}}{0{,}5S_{max} - S_н} \right)^n \right\}^{-1}, \quad (23)$$

где $S_{оп}$ — по данным табл. 2, мм; a — размерный коэффициент; $a = 1$ мм; b — по данным табл. 3; S_{max} — полный ход ползуна по каталожным данным, мм; $S_н$ — номинальный недоход ползуна по данным табл. 3, мм; n — показатель, равный

$$n = A\,(1 - S_{оп}/S_{max})$$

(для главных ползунов $A = 8$; для наружных ползунов прессов двойного действия $A = 16$ при использовании их для вырубки заготовки). Если $S_{оп} \leqslant S_н$, то $K_н = 1$.

Коэффициент $K_д$ устанавливают по табл. 4 для разделительных операций, по табл. 5 для операций гибки с правкой, чеканки, калибровки; для прочих операций принимают $K_д = 1$.

Если нагружение характеризуется несколькими опасными технологическими усилиями, то пресс выбирают по наибольшему расчетному значению номинального усилия $P_н$.

4. Коэффициент долговечности $K_д$ при выполнении вырубки—пробивки прямыми пуансонами

Максимальное усилие вырубки $P_{выр}$, МН	Коэффициент нагрузки $K_н$					
	1	1,25	1,4	1,6	1,8	Св. 2
До 2	1,3	1,1	1,05	1	1	1
2—4	1,8	1,6	1,3	1,2	1,1	1
Св. 4	2,25	1,8	1,6	1,4	1,25	1

5. Коэффициент долговечности $K_д$

Операция	Коэффициент нагрузки $K_н$		
	1,0	1,1	1,25
Гибка с правкой	1,1	1,05	1
Чеканка, калибровка, правка	1,20	1,10	1,05

Если окажется, что принятому значению номинального усилия $P_н$ соответствуют по каталогу больший ход S_{max} ползуна, то необходимо уточнить выбор пресса по усилию в связи с изменением величины $K_н$ в зависимости от S_{max}. Если принятому значению $P_н$ соответствует меньший ход S_{max} ползуна, то уточнение можно не делать, так как при заданном $S_{оп}$ значение $K_н$ уменьшится — будет дополнительный запас прочности.

Прессы с регулируемым ходом обладают наименьшей прочностью при наибольшем ходе ползуна $S_{max\,наиб.}$ (см. табл. 3), поэтому, уменьшая ход ползуна путем регулирования до допустимых технологией пределов, можно поднять величину усилий, допускаемых прочностью, при заданном недоходе $S_{оп}$, так как $K_н$ при этом уменьшается.

При приложении эксцентричной нагрузки на двух- и четырехкривошипных прессах вследствие неравномерного нагружения на одну сторону допускаемые усилия по прочности понижаются. Это понижение учитывается коэффициентом $K_э$, зависящим от смещения центра давления штампа от оси ползуна.

Для четырехкривошипных прессов

$$K_э = \frac{4\,(0{,}5L_ф + x)\,(0{,}5L_c + y)}{L_ф L_c}, \quad (24)$$

где $L_ф$ и L_c — расстояния соответственно между осями подвески ползуна к шатунам по фронту пресса и спереди — назад. Если в каталогах этих размеров не окажется, то следует ориентироваться на размеры ползуна (подштамповой плиты) и соответственно по фронту пресса и спереди — назад; x и y — расстояние соответственно от оси ползуна до центра давления штампа по фронту пресса и вперед или назад.

Для двухкривошипных прессов

$$K_э = (L_ф + 2x)/L_ф. \quad (25)$$

Так как габариты пресса при определении номиналыого усилия $P_н$ еще неизвестны, то учет эксцентричности приложения нагрузки производится методом приближения. Вначале задают $K_э = 1$ и определяют ориентировочное значение номинального усилия, по которому производят предварительный выбор пресса. После этого по каталожным габаритам получают $K_э$ по формулам (24) или (25) и уточняют номинальное усилие $P_н$, по которому производят окончательный выбор пресса.

Прессы двойного действия часто используют для совмещенной штамповки: ходом наружного ползуна осуществляют вырубку заготовки по контуру, а ходом внутреннего — вытяжку. Разным участкам хода наружного ползуна соответствуют различные допускаемые прочностью деталей усилия, поэтому необходима проверка на номинальное усилие по формуле (22).

Проверка по скорости ползуна в начале рабочего хода. Скорость ползуна в начале рабочего хода для кривошипно-ползунного механизма прессов и автоматов

$$v_{н.\,р} = \pi n S_{max} [\sin \alpha_{н.\,р} + (\lambda \sin 2\alpha_{н.\,р})/2]/60, \quad (26)$$

где n — номинальная частота ходов ползуна в минуту по каталожным данным; $\alpha_{н.\,р}$ — угол начала рабочего хода, град;

$$\alpha_{н.\,р} = \arccos [2R\,(R - S_р - u_з) \times (1 + 1/\lambda) + (S_р + u_з)^2]/2R \times (R + R/\lambda - S_р - u_з); \quad (27)$$

R — радиус кривошипа; $R = S_{max}/2$; $S_р$ — величина рабочего хода ползуна по формуле (20); $u_з$ — захождение ползуна; λ — коэффициент шатуна (табл. 6).

Правильность выбора пресса подтверждается условием

$$[v_д] \geqslant v_{н.\,р}, \quad (28)$$

где $[v_д]$ — допускаемая скорость деформирования.

Если это условие не выполняется, следует принять машину с меньшей частотой ходов ползуна или меньшим полным ходом ползуна.

6. Коэффициент шатуна λ

Тип кривошипных прессов или автоматов	λ
Листоштамповочные простого действия:	
с регулнруемым ходом	0,065—0,085
с постояниым нормальным ходом	0,085—0,125
с увеличенным ходом	0,145—0,175
с плунжерной подвеской ползуна	0,3—0,35
Листоштамповочные двойного действия	0,19—0,27
То же, с плунжериой подвеской ползуиа	0,42—0,49
Листогибочные	0,08—0,12
Автоматы:	
многопозиционные	0,1—0,3
с нижним приводом	0,055—0,07

Примечание. $\lambda = R/L$, где R — радиус кривошипа; L — длина шатуна.

Проверка по длительности технологического цикла или по допускаемой работе. Кривошнпные прессы и автоматы оборудованы маховичным прнводом с асинхронным электродвнгателем, номнналыая мощность которого меньше мгновенной мощностн рабочего хода. Дополнительный прнток энергии получают за счет торможения маховнка. В связи с этнм возннкает необходнмость в разгоне маховика электродвнгателем к началу каждого следующего рабочего хода; в протнвиом случае вследствне исчерпання запаса энергни в маховике машнна после совершення некоторого чнсла рабочих ходов остановитси. Величнна торможении, т. е. расход кинетнческой энергии маховика, зависнт от работы на пластическое формоизмененне, треине в шарнирах и направлющих, иа включеиие муфты и др. Поэтому на прессе или автомате можно осуществить ограниченное число технологических цнклов.

Длнтельность $t_ц$ каждого нз технологических циклов должна быть достаточной для баланса расхода энергии в приводе на совершение технологического процесса штамповки и прихода энергии от электродвнгателя как источнпка эиергии.

Один технологический цикл может включать: один рабочий ход при выполнении одной операции; один рабочий ход при выполнении нескольких операцнй одновременно на нескольких позицнях; несколько рабочих ходов, следующнх один за другим, при последовательном выполненин отдельных операцнй иа каждом из этнх ходов.

Технологические цнклы могут выполняться в режиме одноччых ходов с включением-выключением муфты на каждом из них и в режиме последовательных непрерывных ходов без включения муфты.

На рис. 5 показано нзменение частоты вращения маховнка от начальной $n_{max\,н}$ до миннмальной по периодам цикла при работе на одноччых ходах: *I* — падение n_{max} при включенин муфты; *II* — частнчиое восстановление n_{max} прн холостом ходе внз; *III* — падение n_{max} прн выполненни рабочей операцни с определенным графнком *1* силового режнма; *IV* — частнчное восстановление n_{max} прн холостом ходе вверх; *V* — полное восстановление n_{max} при холостом вращеннн маховнка за время технологического цнкла $t_ц$. При работе в режиме непрерывных ходов отсутствует включение муфты н холостое вращенне маховика. Восстановление частоты вращения n_{max} должно произойти в период *IV* — при холостом ходе вверх.

В паспорта кривошнпных прессов н автоматов внесены графнкн работоспособности, с помощью которых можно определить допускаемое чнсло ходов и, следовательно, технологических циклов при работе на одиночных ходах.

Проверку можно выполнить по следующей приближенной методике.

При работе в режиме одиночных ходов с выполиеиием одной рабочей операции за цикл, требующей затраты энергии $A_ф$ (Дж) на пластическую деформацию, время $t_ц$ (с), достаточное для восстановления частоты вращення n_{max} маховика, равно

$$t_ц = [A_ф/\eta_р + (K_1 + K_2) P_н S_{max} 10^3 + K_3 P_и^{1,5} - K_4 N t_{дв.\,х}]/N (1 - K_4), \quad (29)$$

где $\eta_р$ — КПД рабочего хода (табл. 7); K_1 — коэффицнент, учитывающий расход энергии при включении муфты (см. табл. 7); K_2 — коэффицнент, учитывающий расход энергии на холостой ход в процессе одного двойного хода ползуна (см. табл. 7); K_3 — коэффициент, учнтывающий расход энергии на привод автоматнческой подачи с отбором мощности от главного привода (табл. 8); K_4 — коэффициент, учитывающий расход энергии на холостое вращенне ведущнх частей прнвода прн выключенной муфте за время $t_ц - t_{дв.\,х}$ (см. табл. 7); $P_н$ — номинальное усилне выбранного пресса нлн автомата, МН; S_{max} — номнальный ход главного ползуна, мм; N — номинальная мощность электродвигателя по каталожным данным, кВт; $t_{дв.\,х}$ — время одного двойного хода ползуна (см. рис. 5);

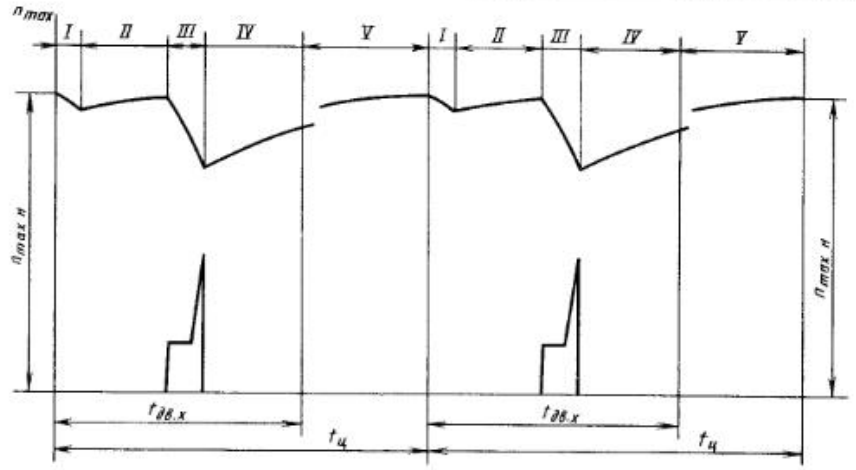


Рис. 5. Изменение частоты вращения маховика в течение технологического цикла

$$t_{дв.\,х} = 60/n \quad (30)$$

[n — номинальная частота ходов (мин$^{-1}$) по каталожным данным].

Если при рабочем ходе в режиме одноччых ходов выполняется i совмещенных операций с различным расходом энергии для каждой из них, то в формулу (29) следует подставлять суммарную работу на пластическую деформацию:

$$A_ф = A_{ф.\,сумм} = \sum_1^i A_{фi}. \quad (31)$$

Если в режиме одиночных ходов за один технологическнй цикл выполняется $n_{оп}$ последовательных операций, то необходимо выделить наиболее энергоемкую из ннх с расходом $A_{ф.\,наиб}$ на пластическую деформацию н эту велнчину подставить в формулу (29). Тогда время полного технологнческого цнкла

$$t_{ц.\,полн} = t_ц n_{оп}. \quad (32)$$

Прн выполненнн штамповкн в режнме последовательных непрерывных ходов прн постоянно включенной муфте

$$t_ц = t_{дв.\,х}. \quad (33)$$

7. КПД рабочего хода, коэффициенты энергопотребления K_1, K_2, K_4 (Дж/МН^{1,5}) и жесткость $c_п$

Тип кривошипных прессов и автоматов	Номинальное усилие $P_н$, МН	$\eta_р$	Муфта на приемном валу K_1^{***}	Муфта на приемном валу K_4^{***}	Муфта на кривошипном валу K_1^{***}	Муфта на кривошипном валу K_4^{***}	K_2^{***}	Жесткость $c_п$, МН/мм
Листоштамповочные простого и двойного действия								
Открытые:								
одношкивошипные	0,025—2,5	0,5—0,6 * 0,6—0,7 **	0,06—0,01	0,025—0,05	0,03—0,005	0,03	0,1—0,01	0,2—0,8
двухкривошипные	1—2,5	0,5—0,6 * 0,6—0,7 **	0,06—0,01	0,03—0,07	0,04—0,01	0,04	0,1—0,01	0,3—1,0
Закрытые:								
одношкивошипные	1,6—25	0,55—0,65 * 0,7—0,80 **	0,1—0,04	0,05—0,1	—	—	0,08—0,02	0,5—2,4
двухкривошипные	2,5—25	0,6—0,7 * 0,7—0,8 **	0,1—0,05	0,1—0,2	—	—	0,06—0,02	0,7—4,0
четырехкривошипные	4—20	0,6—0,7 * 0,7—0,8 **	0,1—0,06	0,15—0,25	—	—	0,06—0,02	0,7—4,0
Листоштамповочные двойного действия	0,63—10	0,70—0,80	0,09—0,07	0,2—0,3	—	—	0,02—0,07	0,6—1,2
Специальные								
Листогибочные	0,63—4	0,6—0,7	0,08—0,05	0,15—0,25	—	—	0,06—0,4	0,4—0,8
Чеканочные	1,6—16	0,8—0,9	0,025—0,01	0,1—0,15	—	—	0,02—0,1	1,5—4,2
Автоматы								
Многопозиционные	0,1—10	0,7—0,6	0,055—0,035	0,1—0,15	—	—	0,04—0,02	0,5—3,0
С нижним приводом	0,1—2,5	0,6—0,5	0,035—0,02	0,05—0,1	0,02—0,01	0,04	0,2—0,06	0,6—2,0

* На операциях вырубки—пробивки.
** На формоизменяющих операциях (вытяжка и др.).
*** Промежуточные значения находятся интерполированием по принятому усилию $P_н$.

Поэтому проверку следует производить на допускаемую работу за каждый ход

$$\sum_1^i A_{\phi i\ \text{расч}} = \left(Nt_{\text{дв. х}} - \right.$$
$$\left. - K_2 P_н S_{\max} 10^3 - K_3 P_н^{1,5}\right)\eta_р. \quad (34)$$

Если окажется, что требующийся расход энергии $\sum_1^i A_{\phi i} > \sum_1^i A_{\phi i\ \text{расч}}$, то необходимо выбрать машину с увеличенной мощностью электродвигателя или уменьшить частоту вращения кривошипа на данной машине.

Выбор листоштамповочных и листогибочных гидравлических прессов.

Выбор по усилию. У гидравлических прессов номинальное усилие $P_н$ может быть достигнуто при любом положении подвижной поперечины, т. е. всегда коэффициент нагрузки $K_н = 1$. Поэтому выбор производят по максимальному технологическому усилию $P_{т\ \max}$ для данной технологической операции:

$$P_н = K_д K_э P_{т\ \max}, \quad (35)$$

где $K_д$ — коэффициент долговечности, учитывающий влияние динамических нагрузок; $K_э$ — коэффициент, учитывающий эксцентриситет нагрузки относительно оси пресса.

При вырубке прямым пуансоном $K_д = 0{,}3 \div 0{,}4$. Если пресс оснащен демпферами, то $K_д = 0{,}55 \div 0{,}65$.

При штамповке с эксцентриситетом, когда центр давления штампа не совпадает с осью пресса,

$$K_э = 4\left[\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\left(\frac{x_1}{L_ф} + \frac{x_2}{L_c} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \frac{4x}{d}\right)\left(1 - \frac{b}{H}\right)\right], \quad (36)$$

где x_1 и x_2 — соответственно проекции эксцентриситета x на оси параллельную и перпендикулярную фронту пресса; $L_ф$ и L_c — расстояния между колониами (стяжными болтами рамных прессов) соответственно вдоль и поперек фронта пресса; d — диаметр колоины (болта); b — расстояние от рабочей поперечины до верхней; H — расстояние от нижней поперечины до верхней.

8. Коэффициент энергопотребления K_3, Дж/МН^{1,5}

Тип подачи	Скорость подачи материала, м/с			
	3	5	10	15
Валковая или грейферная	1000	3200	4000	6300
Револьверная	630	2000	2500	4000

Поскольку геометрические размеры b и H в каталожных данных отсутствуют, то можно принимать $b/H \approx \approx 0{,}25$.

Проверка по линейным технологическим параметрам. Выбранный по усилию $P_н$ пресс должен иметь достаточную величину хода $S_{\max}$ рабочей поперечины, необходимые размеры стола и поперечин и достаточную высоту штампового пространства.

Выбор кривошипных и гидравлических прессов-автоматов для чистовой вырубки. При рабочем ходе ползун пресса-автомата преодолевает сопротивление вырубки $P_{выр}$, сопротивление прижима $P_п$ и сопротивление контрпуансона $P_{к.\,п}$. Величины $P_п$ и $P_{к.\,п}$ составляют доли усилия вырубки. Обычно

$$P_п = 0{,}22 \div 0{,}27 P_{выр};$$
$$P_{к.\,п} = 0{,}38 \div 0{,}43 P_{выр}. \quad (37)$$

Тогда технологическое усилие на ползуне

$$P_т = P_{выр} + P_п + P_{к.\,п} =$$
$$= 1{,}6 \div 1{,}7 P_{выр}, \quad (38)$$

где усилие вырубки $P_{выр}$ берется из технологических расчетов.

Прессы-автоматы для чистовой вырубки характеризуются одним главным параметром — полным номинальным усилием $P_н$. Поэтому выбор пресса-автомата производят по формуле

$$P_н \geqslant P_т = 1{,}6 \div 1{,}7 P_{выр}. \quad (39)$$

В каталогах указывается также ограничение использования машины

по толщине и ширине обрабатываемого материала. Поэтому в том случае, если машина хотя и приемлема по условию (39), но не проходит по толщине и ширине обрабатываемого материала, следует выбрать пресс-автомат с большим номинальным усилием.

Выбор винтовых прессов. Винтовые прессы получили применение на операциях калибровки (рельефной формовки) на заготовках из толстолистовой стали. Эти операции характеризуются высоким сопротивлением деформации и уменьшенным расходом работы $A_ф$ вследствие малой величины самой деформации.

Условие выбора винтового пресса по усилию

$$P_н \geqslant P_{т\,max}. \qquad (40)$$

При использовании винтового пресса необходимо, чтобы кинетическая энергия $L_э$, накопленная в приводе, не превышала, с учетом потерь, требуемой работы пластической деформации $A_ф$. В противном случае усилие пластического формоизменения $P_ф$ резко возрастет и достигнет величины, недопустимой по прочности деталей пресса.

Проверку по величине кинетической энергии выполняют по следующей формуле:

$$L_э = \left(A_ф + P_ф^2/2c_п\right)\eta_м, \qquad (41)$$

где $A_ф$ — работа пластической деформации, кДж; $P_ф$ — усилие пластического формоизменения, кН; $c_п$ — жесткость пресса, кН/м;

$$c_п = (1{,}2 \div 1{,}6)\,10^6\sqrt{P_н} \qquad (42)$$

($P_н$ — номинальное усилие, МН); $\eta_м$ — механический КПД; $\eta_м = 0{,}80 \div 0{,}85$.

По величине кинетической энергии $L_э$ осуществляют настройку на величину хода ползуна.

Иногда винтовые прессы применяют для вытяжных операций. В этом случае выбор пресса производят по кинетической энергии

$$L_{э.\,н} = L_э, \qquad (43)$$

где $L_{э.\,н}$ — номинальная величина кинетической энергии по каталогу; $L_э$ — потребная кинетическая энергия; определяют по формуле (41).

Поскольку пластическое формоизменение в этом случае совершается на большом рабочем ходе, то усилие пластического формоизменения получается значительно меньше номинального, и проверку на $P_ф$ не производят.

Выбор паровоздушных листоштамповочных молотов простого действия. В мелкосерийном и опытном производстве деталей из листовых алюминиевых сплавов и стали применяют молоты простого действия. Как правило, штамповка производится за один удар, реже — сернями последовательных ударов. Выбор молота производят по эффективной кинетической энергии $L_э$ за один удар:

$$L_э = A_ф/z\eta_у, \qquad (44)$$

где z — число ударов на операции; $\eta_у$ — КПД удара; $\eta_у = 0{,}78 \div 0{,}82$. По величине эффективной энергии удара $L_э$ (Дж) устанавливают величину хода падающих частей H_m (м) к началу рабочего хода:

$$H_m = L_э/G\eta_м, \qquad (45)$$

где G — сила тяжести падающих частей, включая верхний штамп, Н; $G = mg$ (m — масса падающих частей по каталожным данным, кг); $\eta_м$ — механический КПД; $\eta_м = 0{,}95$.

По каталогу следует проверить, соответствует ли величина H_m полному ходу падающих частей.

Выбор ротационных листогибочных машин. К указанному типу машин ротационного действия отнесены: листогибочные машины с поворотной гибочной балкой, листогибочные машины трех и четырехвалковые, зиг-машины.

Каталоги на эти машины содержат необходимые данные для их выбора: толщину и ширину обрабатываемого материала, радиус гибки, расстояние между осями рабочих валков и т. д.

Выбор трубогибочных машин. Выбор производят на основании данных каталогов: по наружному диаметру обрабатываемой трубы, по толщине стенки, по радиусу гибочного сектора и т. д.

Выбор дисковых листовых ножниц. Выбор производят по наибольшей толщине разрезаемого листа и по вылету ножей (определяет габариты детали); указанные данные приведены в каталогах.

Глава 22 ПОСТРОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Качество конструкторско-технологической подготовки производства определяется уровнем разработки технологии на четырех основных этапах:

отработка технологичности конструкции детали, узла, изделия;

разработка маршрутной технологии, определение потребности в оборудовании, оснастке, средствах автоматизации и механизации, укрупненный анализ технико-экономических показателей производства нового изделия;

разработка рабочей технологии, проектирование штампов, другой оснастки, средств автоматизации и механизации;

наладка и внедрение новых технологических процессов, корректировка их по результатам наладки.

На первом этапе конструкторы при участии технологов по различным видам обработки и сборке создают технологичную конструкцию изделия, осуществляют увязку конструкторских идей с требованиями и возможностями производства. К этой работе следует приступать в начальной стадии конструкторских разработок нового изделия. Например, для автомобиля — в процессе создания макета внешних форм и эскизной проработки конструкции, т. е. за 2—2,5 года до выдачи чертежей на подготовку производства.

В ходе отработки технологичности решается задача достижения необходимого уровня качества детали (узла, изделия) при минимальных материальных, трудовых и энергетических затратах. Важнейшие требования развития технологии, которые обеспечиваются на данном этапе, следующие:

применение экономичных способов штамповки;

укрупнение деталей, сокращение числа штампованных деталей в узле, изделии по сравнению с известными аналогами;

применение прогрессивных материалов и, в первую очередь, низколегированных сталей, экономичных профилей, эффективное использование материалов и отходов;

автоматизация и механизация производственных процессов, применение прогрессивного оборудования;

необходимая стойкость и работоспособность штампов;

рациональная унификация и стандартизация элементов в новом изделии и в оснастке для его изготовления.

Для определения возможности удовлетворения этих требований выполняют качественную оценку уровня технологичности деталей, узлов, изделий — сравнение с базовым вариантом или аналогами.

Второй этап включает разработку маршрутной технологии и анализ на ее основе уровня технологии, ее количественную оценку по ряду технико-экономических показателей: суммарной норме расхода материала и коэффициенту использования материала на изделие и по видам материала; трудоемкости по узлам, на изделие в целом, по группам оборудования; ожидаемому уровню автоматизации и механизации. Данные критерии позволяют активно воздействовать на конструкцию, совершенствовать ее, нацеливая отработку конструкции на конкретные объекты (детали, узлы). Результаты разработки второго этапа служат также исходными данными для проекта реконструкции производства или строительства нового завода, цеха, для выбора и заказа оборудования.

Третий этап — разработка рабочей технологии и другой конструкторско-технологической документации, запуск ее в производство, поэтапное изготовление штампов.

На четвертом этапе, заключительном, осуществляется реализация разработок, выполненных в период

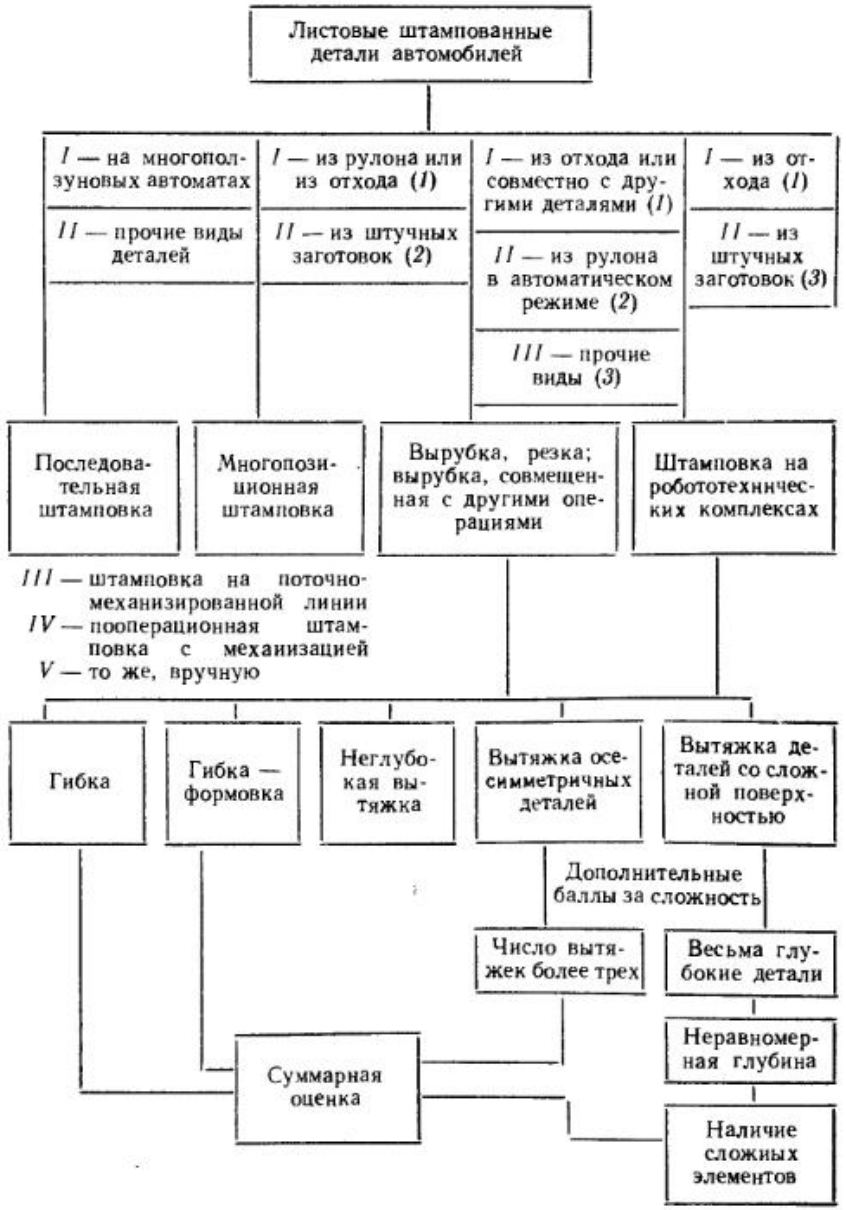


Рис. 1. Классификатор штампованных деталей:
1, 2, 3 — число баллов оценки технологической сложности; *I, II, III* — приоритетный класс по экономичности и достижимому уровню автоматизации

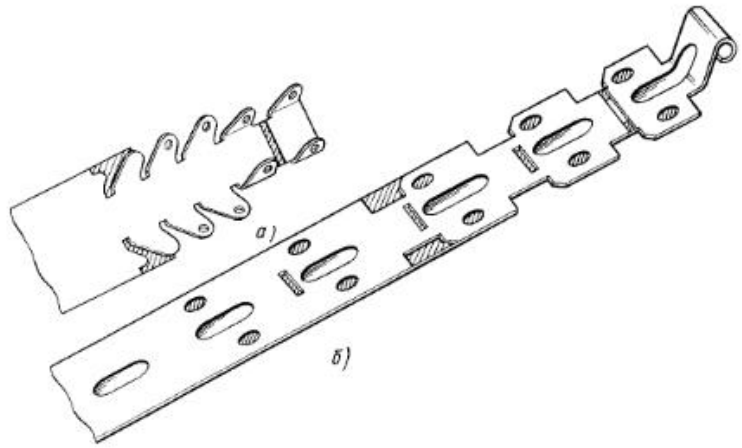


Рис. 2. Примеры применения последовательной штамповки:
а — на обычном прессе с правильно-подающим устройством; *б* — на многопозиционном; прессе-автомате

технологической подготовки производства.

Проектируемая технология должна быть сориентирована на определенные методы обработки и состав оборудования. В связи с этим для условий каждого конкретного производства следует разработать классификатор штампованных деталей. Классификатор, показанный на рис. 1, применим для прессового производства легковых автомобилей и содержит приближенную балльную оценку технологической сложности деталей, которая возрастает вправо — вниз. Технологичность узла или изделия может быть оценена по сумме баллов входящих деталей. Меньшим числом баллов оценивается возможность применения более прогрессивного метода изготовления. Подсчет баллов и сопоставление числа входящих деталей целесообразно вести в первую очередь по определяющим узлам, например, для автомобиля, таким, как кузов, дверь в сборе и т. д. Таким образом выявляются недостатки проектируемой конструкции, и, при отсутствии технического обоснования, такие недостатки подлежат устранению с целью доведения конструкции до уровня, превышающего аналог.

В общем случае разработку технологии на конкретную деталь начинают с анализа ее конструкции и предварительного выбора оборудования и метода штамповки, исходя из требований качества и приоритета вида обработки. Сначала оценивают возможность и целесообразность применения последовательной штамповки в ленте (рис. 2). Приоритет последовательной штамповки, в особенности для условий крупносерийного и массового производства, объясняется высокой производительностью процесса и точностью изготовляемых деталей. Диапазон ее применения весьма широк — от мелких деталей из проволоки и специальных профилей шириной (стороной, диаметром) в несколько миллиметров до деталей сложной пространственной формы, штампуемых из рулона шириной 1600 мм и более. Изготовление мелких и особо мелких деталей последовательной штамповкой иногда приводит к некоторому увеличению расхода металла по сравнению с пооперационной — традиционной штамповкой. Однако применение последовательной штамповки позволяет полностью автоматизировать процесс изготовления детали, ликвидировать опасность травмиро-

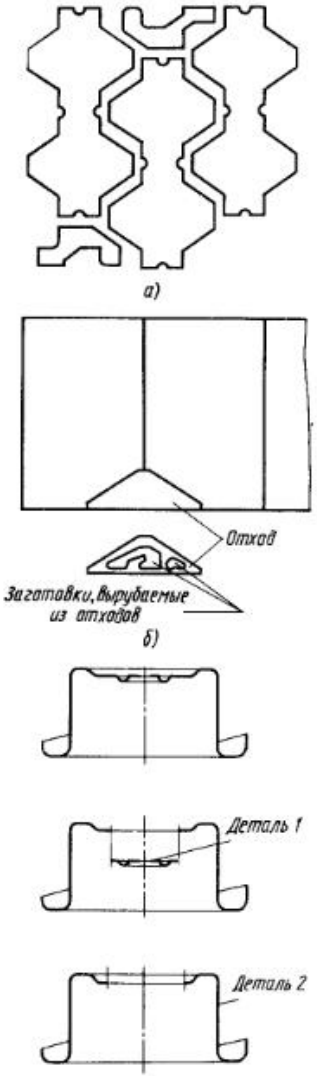


Рис. 3. Виды эффективного использования металла:

а — комбинированный раскрой; *б* — использование отхода и совместная штамповка двух деталей

вания рабочего при закладке мелких деталей в штамп. В случае, если применение последовательной штамповки экономически или технически не оправдано, в условиях изготовления крупных партий деталей (более 5 тыс. шт.) следует ориентировать технологию на многопозиционный пресс или автоматическую линию.

Задачу рационального использования материала решают следующими путями:

комбинированным раскроем, совместной штамповкой нескольких деталей (рис. 3, *а*);

использованием отхода, образующегося при штамповке или резке для изготовления других заготовок или деталей (рис. 3, *б*);

оптимизацией раскроя;

применением листа кратных размеров или рулона.

Важно, чтобы при освоении производства новых деталей или изделий сортамент применяемых материалов не расширялся, а планомерно сокращался, т. е. обоснованное введение новых типоразмеров проката должно с избытком компенсироваться за счет действующего сортамента.

Комбинированный раскрой и совместная штамповка одновременно нескольких деталей применимы для любого типа деталей (крупных, средних и мелких) и сопряжены лишь с некоторым усложнением оснастки. Использование отходов, в особенности мелких, трудоемко и травмоопасно, поэтому для сбора отходов целесообразно применение специальных конвейеров, сбрасывателей, стапелирующих устройств, а для последующей загрузки их в штамп — роботов, загрузчиков, питателей. Предпочтительно изготовлять из отхода детали с большей массой, форма которых предопределяет низкий коэффициент использования. При комбинированной вырубке стойкость рабочих частей штампа для всех вырубаемых деталей должна быть сбалансированной.

Построение оптимальных схем раскроя — задача сложная и многовариантная, однако она успешно решается существующими методами автоматизированного проектирования.

После принятия решения о способе штамповки, варианте рационального использования материала и выборе оборудования выполняется окончательное проектирование технологического процесса. Комплексная разработка технологического процесса включает следующие основные стадии:

установление числа операций, их содержания и последовательности, расчет технологических параметров процесса;

анализ загрузки оборудования и ее изменения в связи с введением новой технологии;

организация рабочих мест, решение вопросов техники безопасности;

установление способов транспортирования и укладки заготовок и деталей, выбора типа тары, а при необходимости — проектирование и изготовление новых видов контейнеров, подвесок.

Для значительной части деталей, получаемых вырубкой, гибкой, вытяжкой, варианты наиболее оптимальной технологии разработаны и хорошо изучены. При проектировании технологического процесса в этом случае могут возникнуть трудности лишь частного характера. Далее будут описаны наиболее существенные из них.

Вырубка, пробивка, чистовая вырубка. При вырубке, пробивке, чистовой вырубке весьма важен правильный выбор размеров технологических перемычек, масштабного фактора, типа штампа и вида оборудования, на которых выполняется операция. В общем случае перемычки при традиционной вырубке назначают в соответствии с рекомендациями гл. 14. При чистовой вырубке перемычки назначают с учетом размещения клиновидного ребра (см. гл. 2). Зазоры для чистовой вырубки допускается выдерживать не по всему контуру, а только на участках, где это необходимо; остальную часть контура и отверстия выполняют с несколько увеличенными зазорами (в 2—5 раз), перемычки принимают несколько увеличенными (до 20 %).

Область применения чистовой вырубки постоянно расширяется, выявляются новые возможности этого прогрессивного метода обработки, позволяющего получать детали высокой точности (рис. 4). Построение технологического процесса чистовой штамповки ведут по следующей приближенной схеме.

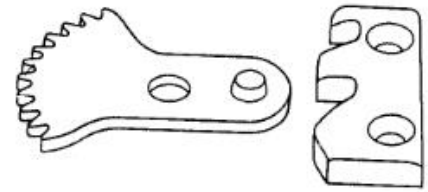


Рис. 4. Примеры применения чистовой вырубки

1. Анализ геометрии детали, ее функционального назначения, уточнение целесообразности применения чистовой вырубки с учетом выбранного для обработки материала. При этом устанавливаются зоны, где на поверхности разделения может иметь место скол, и определяют его процентное соотношение ко всей поверхности разделения, а также места, где скол недопустим. Принимается решение о возможности выполнения или необходимости изменения формы контура разделения в отношении относительно малых радиусов кривизны и отверстий, узких пазов, малых расстояний между отверстиями и от края детали, оценивают величину возможной утяжки (см. гл. 2).

2. Выбор положения клиновидного ребра. Для материала толщиной менее 3 мм ребра на матрице делать не рекомендуется; на участках контура, где не требуется чистый срез, допускается ребро не располагать.

3. Выбор типа штампа: совмещенный, последовательный или простой, для пооперационной штамповки. Наиболее предпочтительным является применение совмещенного штампа. Последовательную штамповку применяют в следующих случаях: если размеры перемычек составляют менее 0,6 толщины полосы; для выполнения гибочных операций; при расположении фаски (цековки) с противоположной заусенцу стороны.

4. Построение схемы раскроя с учетом технологических перемычек, клиновидных ребер и ряда особых требований. Так, схема раскроя полосы должна обеспечить легкость удаления штампованных деталей и отходов; при этом сложная часть контура детали

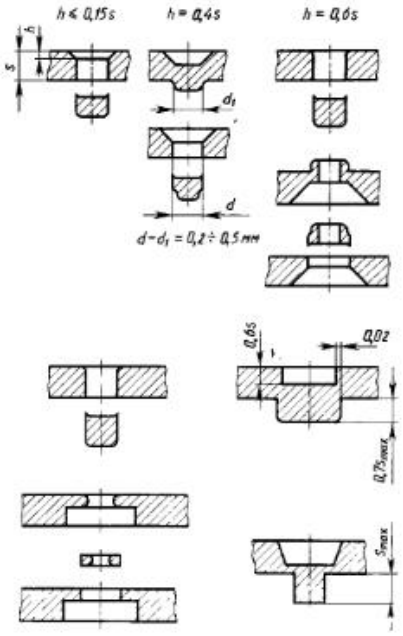


Рис. 5. Схемы чеканки фасок, получения углублений и выступов на штампах чистовой вырубки

должна быть обращена в сторону, противоположную направлению подачи полосы.

5. Определение усилий вырубки, противодавления и усилия прижима и внедрения клиновидного ребра (см. гл. 2).

6. Выбор оборудования. Как правило, число типов прессов для чистовой вырубки деталей конкретного типоразмера невелико (редко более трех), поэтому при разработке технологии сразу выбирают один из них — по усилию и допустимым размерам штампа.

7. Прогнозирование стойкости штампа (см. гл. 19), сопоставление ее с величиной партии изготовляемых деталей; технико-экономическое обоснование выбора метода обработки. Затраты на подготовку производства и эксплуатационные расходы по методу чистовой вырубки сопоставляются с данными для традиционной обработки (вырубка, литье или горячая

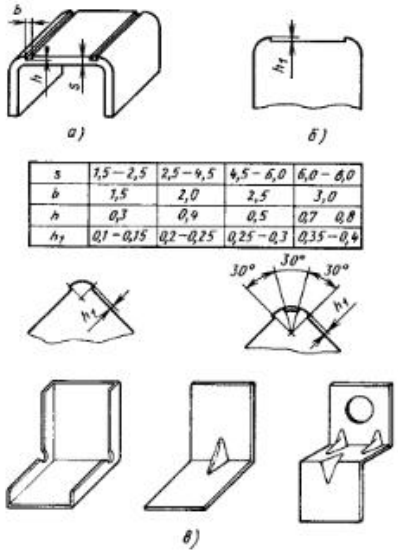


Рис. 6. Некоторые способы уменьшения пружинения:
а — чеканка углублений со стороны матрицы; *б* — занижение участков пуансона; *в* — введение бортов и ребер жесткости

штамповка с последующей многоступенчатой механической обработкой), оценивается уровень качества для вариантов технологии.

Обрабатываемый материал для чистовой вырубки, как правило, низкоуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,2 % (горяче- и холоднокатаные; применяются без отжига в состоянии поставки). При содержании углерода свыше 0,2 % для получения деталей без скола металл должен иметь в структуре 90 % сфероидального цементита, что достигается сфероидизирующим отжигом. Хорошо поддаются чистовой вырубке медь, медные сплавы (бронзы — только бессвинцовые; содержание олова — не более 2 %), алюминий и его сплавы в незакаленном состоянии.

На рис. 5 приведены схемы некоторых технологических приемов чистовой штамповки.

Гибка, гибка—формовка, формовка. Наиболее сложная проблема — необходимость учета пружинения и определение мер по снижению его влияния.

Особое значение учет пружинения приобретает в связи с широким применением низколегированных сталей. Имеющиеся формулы и графики по определению пружинения не всегда отвечают реальным условиям, поэтому на практике при высоких требованиях к точности гибки чаще используют один из следующих способов снижения пружинения:

чеканка углублений со стороны матрицы (выталкивателя, нижнего прижима) (рис. 6, *а*);

локализация зоны правки в зоне гибки (рис. 6, *б*);

введение ребер жесткости и бортов (рис. 6, *в*).

Перечисленные меры позволяют снизить пружинение, а также компенсировать влияние разброса свойств и колебания толщины исходного материала, однако для получения точных деталей в ходе наладки, как правило, требуется корректирование геометрии рабочих частей штампа и зазоров. При гибке и формовке деталей из низколегированных сталей особенно эффективно введение в конструкцию детали бортов и ребер, в особенности при радиусах гибки, составляющих более 1,5 толщины заготовки, так как в этом случае нестабильность свойств (по сравнению с обычными углеродистыми сталями) сказывается особенно резко.

Вытяжка. Процесс вытяжки отличается наибольшим многообразием вариантов формообразования. Для вытяжки деталей правильной формы — цилиндрической, полусферической, конической и т. д. — механика процесса хорошо изучена и отработка технологии ведется по существующим рекомендациям.

В связи с укрупнением и усложнением деталей все чаще применяют варианты их конструкции с элементами формовки, гибки, вытяжки во фланце или донной части, иногда — в боковой поверхности. Технология изготовления детали с обратной вытяжкой в донной части может быть реализована в вариантах, показанных на рис. 7: *а* — наиболее прост и надежен; *б* — позволяет лучше использовать материал центральной части, но процесс сложнее в наладке; *в* — приемлем для небольшой глубины изготовляемой

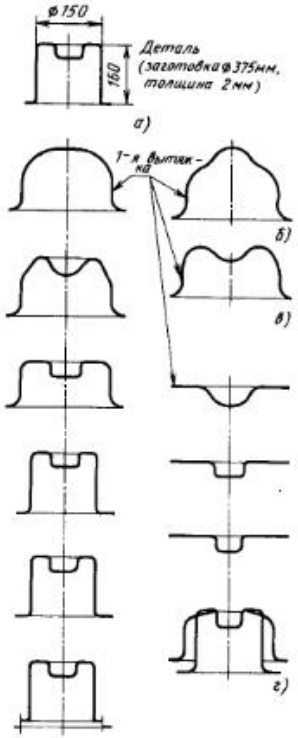


Рис. 7. Схемы изготовления детали с углублением в донной части

детали; *г* — нежелателен, так как вытяжка на первых переходах ведется с широким фланцем (необходимость в применении более сложных штампов).

В вариантах *а*, *б* и *в* вытяжка происходит с минимальным размером фланца, что обеспечивает устойчивость металла при формообразовании и относительную равномерность распределения деформаций.

В процессе наладки подобных штампов необходимо отрегулировать величину утонения металла изменением радиусов кромок пуансонов и матриц и геометрии зоны, где проявляется утонение, высоты отдельных участков полуфабрикатов по операциям. Надежность наладки проверяется замером утонения на образце, который вырезается в виде сектора с углом

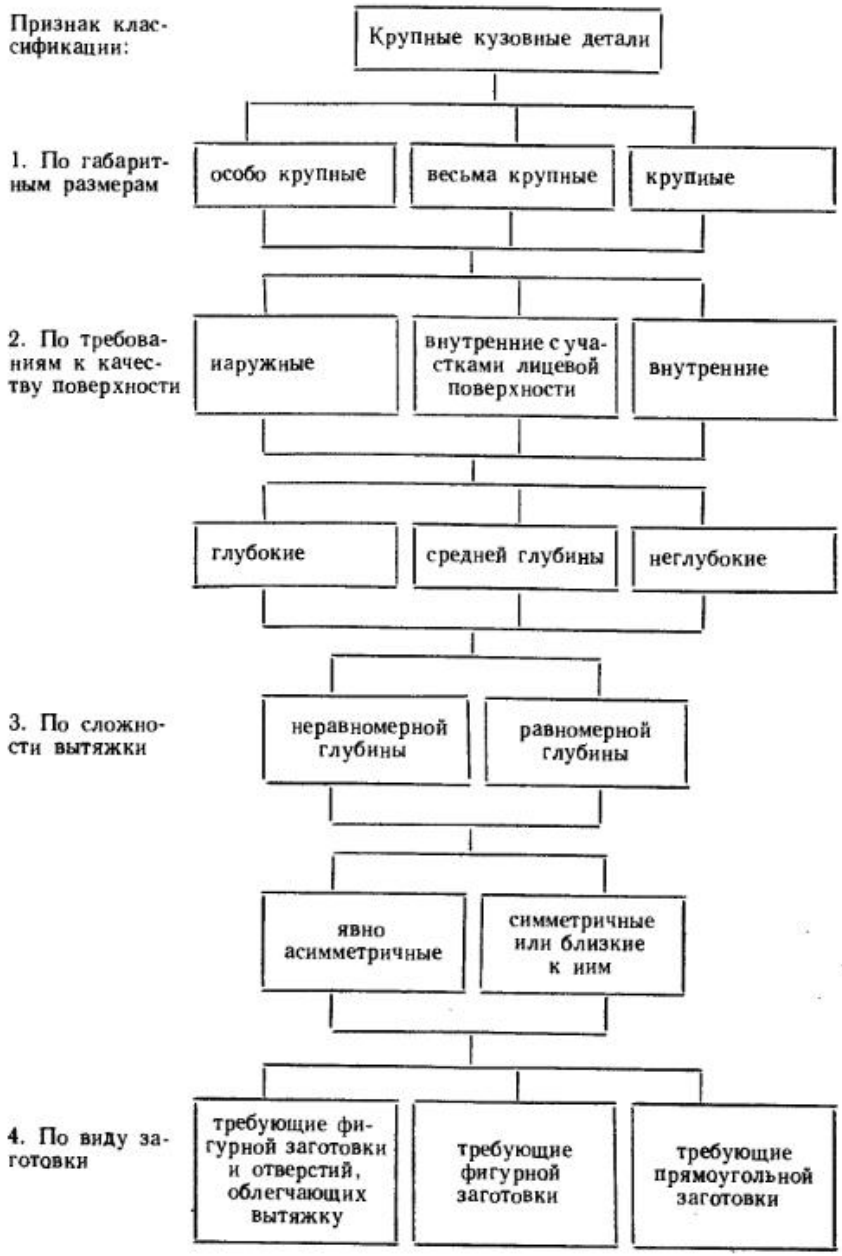


Рис. 8. Классификация деталей кузова легкового автомобиля, получаемых вытяжкой

10—20° из полуфабрикатов. Критические участки определяются визуально по проявлению «матовостн», «апельсиновой корки», полос сдвига. Максимально допустимое утонение, если оно специально не регламентируется чертежом, составляет 30 % исходной толщнны заготовки.

Отработка технологии вытяжки крупных деталей сложной формы, например кузовных панелей автомобиля, специфична и в общем виде может быть классифицироваиа, как показано на рис. 8.

Разработка технологии вытяжки включает ряд обязательных этапов, которые могут выполняться в различной последовательности. Предлагаемый ниже порядок разработки технологии вытяжки направлен на то, чтобы в процессе проектирования было по возможности меньше возвратов к предыдущим этапам. Это особенно важно при автоматизированном проектированин технологии.

Последовательность отработки технологии вытяжки крупной кузовной детали включает следующие этапы:

1. Анализ формы детали и построение на его основе формы полуфабриката после операций вытяжки и обрезки в виде чертежа, модели, а для автоматизированного проектирования — математической модели. Отличие формы полуфабриката после обрезки от формы детали состоит в технологических отступлениях, в частности, в направлении фланцев, которые развертываются в положение, наиболее удобное для вытяжки и обрезки. Простым и наглядным способом развертывания фланцев является их моделирование из листового воска (наклеивание на мастер-модель) с последующим отгибанием в положение обрезки. Обычно производят лишь местное моделирование иа более сложных участках детали, в местах перехода одной поверхности в другую; на остальных участках линию обрезки наносят разметкой. Развертывание фланцев лицевых деталей сопровождается смещением линии перегиба (линии фланцовки) в направлении от внешнего контура на 3—5 мм на последующих операциях. Это делается с целью исключения следов перегибов иа основной поверхности детали. На рис. 9 показан пример развертывания на 90° вертикального, а на рис. 10 — на 180° горизонтального фланцев наружной панели крышки багажника легкового автомобиля.

При отработке формы полуфабриката после операций вытяжки и обрезки некоторых глубоких, неравномерной глубины деталей прибегают к приемам, облегчающим процесс вытяжки, например: к некоторому уменьшению их глубины с одновременным увеличением радиуса матрицы (см. рис. 9, *а*), к наклону стенок (см. рис. 9, *б*), уменьшению числа перегибов в зоне рабочей кромки матрицы (см. рис. 9, *в*).

В отдельных случаях, когда форма изготовляемой детали требует применения сложного изогнутого прижима, а ее положение на различных операциях не одинаковое, следует рассмотреть возможность разгибки детали, т. е. придания ей более простой формы (рис. 9, *г*).

С точки зрения минимизации технологических припусков важен правильный выбор ширины B и глубины H технологической ступеньки (рис. 10). В общем случае эти припуски назначают достаточными для обеспечения натяжения панели и сохранения необходимой стойкости обрезного штампа. Чаще всего обрезку выполняют по всему контуру с одновременным отделением отхода разрезными ножами (рис. 11, *а*). Соотношение ширины и глубины технологической ступеньки в значительной степени определяется стойкостью разрезных ножей с учетом места их установки. При обрезке неглубоких внутренних деталей выпуклостью вниз (с целью сохранения постоянного положения детали на всех операциях) ширину ступеньки обычно лимитирует стойкость секций матрицы (рис. 11, *б*). В общем случае ширину B ступеньки выбирают в пределах 16—24 мм; в местах резких перегибов линии обрезки этот размер может быть несколько увеличен или уменьшен.

Построение формы полуфабриката на данной стадии не является окончательным, и на последующих этапах разработки технологии она может корректироваться.

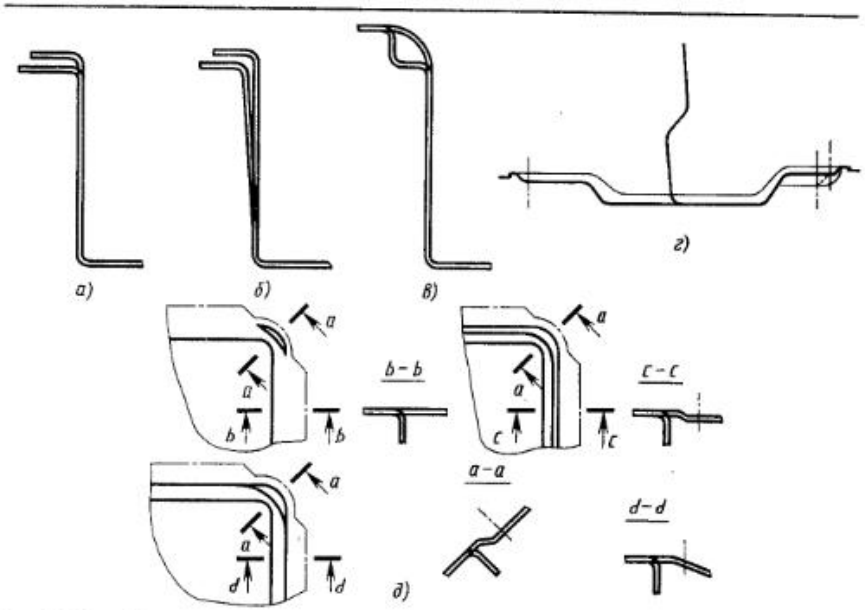


Рис. 9. Способы улучшения условий вытяжки и фланцовки:
а — уменьшение глубины, увеличение радиуса; *б* — то же, с наклоном стенки; *в* — упрощение кривизны в зоне радуса; *г* — разгибка детали; *д* — введение ступенек для облегчения фланцовки

3. Выбор метода торможения фланца. Для сложных, глубоких, с неравномерной глубиной деталей в ряде случаев можно применять перетяжное ребро, в частности, если по периметру матрицы (прижима) на различных участках требуется различное, резко изменяющееся по интенсивности торможение фланца. Однако более рациональным для всех деталей является применение перетяжного порога.

Применение перетяжного порога позволяет значительно уменьшить площадь заготовки, находящуюся под прижимом, и глубину технологической ступеньки. Пороги выполняют на стальных секциях вытяжного штампа копированием по рабочей модели, на которую их наносят при изготовлении модели вытяжки («гипсовки»). Размеры порогов устанавливают в зависимости от типа детали. Для деталей малой кривизны, ориентированной в одном направлении, можно применять метод обтяжки-формовки, который осуществляют при жестком защемлении фланца.

3. Определение наклона прижимной поверхности вытяжного штампа. Целью отработки оптимального наклона прижимной поверхности к горизонтальной плоскости является создание сбалансированных условий для различных участков при вытяжке. При этом необходимо обеспечить удобную загрузку ее в штамп и возможность удаления полуфабрикатов средствами автоматизации и механизации.

4. Построение прижимной поверхности вытяжного штампа.

Форма и положение прижимной поверхности должны быть максимально приближены к форме полуфабриката после обрезки, находящегося в положении, соответствующем п. 3. Прижимная поверхность должна обладать достаточной плавностью переходов с тем, чтобы при зажатии фланца между прижимом и матрицей, а также при воздействии пуансона на заготовку на ее поверхности не возникали гофры и складки. Поверхность прижима для простых случаев может быть развертывающейся, но, чаще, в связи с усложнением формы деталей, применяют неразвертывающуюся поверхность (рис. 12).

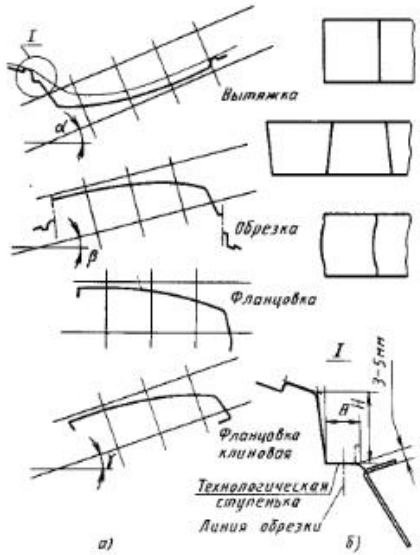


Рис. 10. Схема технологических переходов изготовления наружной панели крышки багажника легкового автомобиля:
а — последовательность операций; *б* — варианты раскроя металла; α, β, γ — углы, определяющие положение детали; *B* и *H* — ширина и глубина технологической ступеньки

Предварительно найденные на начальном этапе значения глубины *H* технологической ступеньки (см. рис. 10) увязывают с формой прижима. Для лицевых деталей недопустимо перетекание материала заготовки через «гребень» пуансона (линию пересечения двух поверхностей пуансона) и проникновение на лицевую поверхность следов перетекания заготовки по кромке матрицы.

5. Определение формы и размеров заготовки.

Форму заготовки уточняют во взаимосвязи с формой контура проема матрицы. При этом руководствуются соображениями качества и экономии металла, а также требованием постоянства ширины фланца в конце вытяжки. Размеры оптимальной заготовки определяют замером длины развертки сечений модели в критических сечениях, делая поправку на растяжение металла. Замер ведут по всей длине сечения с учетом недохода (~5 мм) кромки заготовки до ближайшего

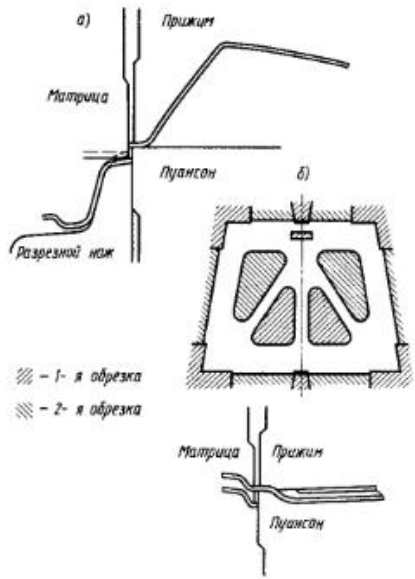


Рис. 11. Схемы процесса обрезки:
а — обрезка за одну операцию с разрезкой отхода на части; *б* — распределение зон 1-й и 2-й обрезок и фрагмент сечения штампа при обрезке за две операции



Рис. 12. Примеры неразвертывающейся прижимной поверхности:
а — с наложением кривизны во взаимно перпендикулярных направлениях; *б* — с различным направлением кривизны на противоположных сторонах отверстия матрицы

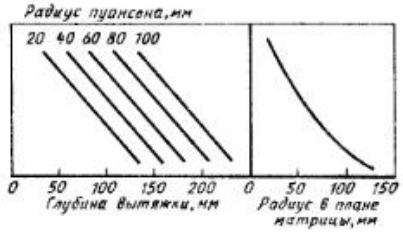


Рис. 13. Зависимость радиуса в плане матрицы от глубины вытяжки и радиуса пуансона

к проему матрицы ребру (порогу). Из соображений экономии металла возможно нарушение этого условия. В ходе наладки вытяжного штампа определяют возможность вытяжки с переходом кромки через порог (ребро), после чего окончательно определяют размер заготовки.

Для определения радиуса матрицы в плане в зависимости от глубины вытяжки можно пользоваться номограммой, показанной на рис. 13.

Полученный вытяжкой полуфабрикат проверяют на соблюдение следующих условий:

плавность и равномерность распространения пятна контакта пуансона с заготовкой (по мере продвижения пуансона в матрицу) от заданной или центральной части к периферии;

равномерность втягивания заготовки из фланца в проем вытяжного штампа;

отсутствие следов перетекания металла через «гребень» пуансона и кромку матрицы, в особенности на лицевых участках поверхности.

В процессе наладки сложных вытяжных штампов нередко выявляется необходимость их доработки, изменения ранее принятых технологических решений, параметров. В объем наладочных работ, в частности, входит установка перетяжных ребер, доработка порогов и ребер по высоте и радиусам, изменение радиусов пуансона и матрицы, оптимизация заготовки, установка фиксаторов под уточненную заготовку и т. д. При неудовлетворительных результатах, проведенных в полном объеме наладочных работ, необходимо более углубленно проверить качество исходного материала, провести его лабораторный анализ по методу координатных сеток. В результате устанавливают путь решения проблемы: доработкой конструкции детали, усовершенствованием технологии, применением металла более высокого качества или сочетанием каких-либо из перечисленных мер. В случае особо сложной вытяжки в виде исключения допускается изготовление опытного штампа для проверки правильности выбранных технологических решений. Такие штампы изготовляют из пластмасс, цинковых или других легкоплавких сплавов. При дальнейшей технологической проработке необходимо руководствоваться следующими общими требованиями:

точная и, по возможности, постоянная фиксация детали в штампах;

надежное удаление отходов, создание условий безопасного сбора используемых отходов, отсутствие на детали и отходе острых углов и выступов;

простота загрузки и удаления деталей;

обособление разделительных операций (недопустимо совмещение с операциями правки).

Принципы построения технологического процесса для различных предприятий в значительной степени сходны, их отличия вызваны разными условиями производства, которые определяются сочетанием следующих основных компонентов: металлоемкость и трудоемкость продукции, их соотношение; масштаб и характер производства; номенклатура; стабильность или, наоборот, частые смены объекта производства. Универсальных рекомендаций по оценке уровня технологии и определению направлений ее развития быть не может. Такие рекомендации должны быть разработаны для каждого предприятия с введением количественных оценок, определяющих технический уровень производства в целом. Система оценок может носить приближенный характер и должна постоянно совершенствоваться. В ней необходимо выделить моменты, существенно влияющие на экономическую эффективность, выявить взаимосвязи вопросов качества и количественных характеристик трудоемкости, металлоемкости, энергоемкости, указать пути преодоления противоречий между этими характеристиками, после чего вывести рекомендации по установлению оптимального варианта технологии. Количественная оценка необходима для сравнения уровня разработанной (разрабатываемой) технологии с действующими передовыми отечественными и зарубежными аналогами и для планирования уровня технологии как на ближайшую, так и на отдаленную перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аверкиев Ю. А., Башков Б. Ф.** Отбортовка с утонением стенки//Кузнечно-штамповочное производство. 1976. № 9. С. 21—22.

2. **Аверкиев А. Ю.** Методы оценки штампуемости листового металла. М.: Машиностроение. 1985. 176 с.

3. **Аверкиев Ю. А.** Холодная штамповка: Формоизменяющие операции. Ростов. Изд-во РГУ. 1984. 288 с.

4. **Аналитическое** определение сопротивления деформации алюминиевых сплавов/Я. М. Охрименко, В. И. Щерба, А. В. Недугов и др.//Известия вузов. Черная металлургия. 1983. № 5. С. 52—55.

5. **Бабаев Ф. В.** Оптимальный раскрой материалов с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение. 1982. 168 с.

6. **Блинов М. А., Тришиевская Т. Ф., Кипнис Б. В.** Пробивка отверстий на универсальном штампе с применением полиуретана//Кузнечно-штамповочное производство. 1979. № 10. С. 28—29.

7. **Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Смирнов С. В.** Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия. 1984. 144 с.

8. **Бондаренко В. Т., Маркин Ю. Н.** Гибка змеевиков из трубных плетей на малый радиус//Кузнечно-штамповочное производство. 1983. № 5. С. 30—32.

9. **Бондаренко В. Т., Чесноков В. И., Ткаченко О. А.** Гибка унифицированных панелей//Кузнечно-штамповочное производство. 1983. № 4. С. 17.

10. **Боярский М. Д., Марченко В. Л., Поволоцкий Г. Ю.** Изготовление деталей из стальных тонкостенных труб//Кузнечно-штамповочное производство. 1979. № 3. С. 15—18.

11. **Брухис М. М., Крачун А. Т., Морарь В. Е.** Лабораторные и производственные испытания новой смазки для холодной обработки металлов давлением//Кузнечно-штамповочное производство. 1983. № 2.

12. **Бузиков Ю. М., Кузнецов В. П., Ренне И. П.** Конструкция и эксплуатация сверхточных и вытяжных матриц с регулируемым диаметром калибрующей части//Кузнечно-штамповочное производство. 1975. № 10. С. 18—19.

13. **Вайнтрауб Д. А., Джантотаев Э. Ю.** Опыт повышения качества штампованных гнутых деталей//Кузнечно-штамповочное производство. 1978. № 2. с. 15—18.

14. **Веретенова Т. Н., Балин А. И., Цигельнюк Л. И.** Смазочно-охлаждающие технологические средства для холодной обработки металлов давлением//Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 6. С. 27—29.

15. **Верховский Л. Н.** Совершенствование технологии листовой штамповки в прессовом производстве ВАЗа//Передовой производственный опыт в автомобилестроении. Экспресс-информация. Тольятти. НИИНавтопром. 1982. № 9. С. 3—8.

16. **Верховский Л. Н.** Способы торможения фланца при вытяжке//Организация автомобильного производства. Экспресс-информация. НИИНавтопром. Тольятти. 1982. № 19. С. 32—35.

17. **Вишиевский Н. С., Овчинников А. Г.** Исследование процесса чистовой вырубки со сжатием//Кузнечно-штамповое производство. № 1. 1974. С. 18—19.

18. **Гальперин А. И.** Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов. М.: Недра. 1983. 203 с.

19. **Геллер Ю. А.** Инструментальные стали. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия. 1983. 311 с.

20. **Грудев А. П., Зильберг Ю. В., Тилик В. Т.** Трение и смазки при обработке давлением: Справочник. М.: Металлургия. 1982. 312 с.

21. **Горбунов М. Н.** Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов. М.: Машиностроение. 1981. 224 с.

22. **Ершов А. Г.** Формообразование патрубков из труб изгибом, вталкиванием в фильер с внутренним давлением//Кузнечно-штамповочное производство. 1974, № 7. С. 23—26.

23. **Живов Л. И., Овчинников А. Г.** Кузнечно-штамповочное оборудование. Прессы: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Киев:Вища школа. 1981. 376 с.

24. **Заломнова К. В.** Вальцовочные соединения. М.: Машиностроение. 1980. 136 с.

25. **Зотов В. И., Михаленко Ф. П.** Износостойкость разделительных штампов с литыми матрицами из сплава на основе цинка и их применение в пронзводстве//Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 10. С. 5—7.

26. **Зубцов М. Е., Корсаков В. Д.** Стойкость штампов. М. — Л.: Машиностроение. 1971. 199 с.

27. **Исаченков Е. И.** Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение. 1978. 208 с.

28. Исследование работоспособности твердых сплавов при вырубке электротехнической стали/В. А. Фальковский, М. В. Куралина, Л. А. Чумакова и др.//Кузнечно-штамповочное производство. 1982. № 6. С. 18—20.

29. **Калиновский И. П., Чудин В. Н., Мозгов В. А.** Штамповки переходников с наклонным фланцем из сплава АМг-6//Кузнечно-штамповочное производство. 1983. № 12. С. 17—19.

30. **Каюшин В. А., Рение И. П.** Экспериментальное исследование способов отбортовки фланцев на концах труб последовательной раздачей коническим и плоским пуансонами//Кузнечно-штамповочное производство. 1983. № 12. С. 11—14.

31. **Коваленко А. Н.** Способ зачистки заготовок из низкоуглеродистых сталей//Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 4. С. 20—21.

32. **Комаров А. Д.** Развитие и совершеиствование процессов штамповки деталей эластичной среды//Кузнечно-штамповочное производство. 1982. № 12. С. 27—30.

33. **Комаров А. Д., Скобляков В. И., Дзядель Е. В.** Вырезные шаблоны для вырезки—пробивки из листа полиуретаном//Кузнечно-штамповочное производство. 1978. № 6. С. 31—33.

34. **Конструктивные** особенности твердосплавного инструмента для обработки металлов давлением/В. С. Рыжеванов, Т. А. Лившиц, А. Н. Блинков и др.//Кузнечно-штамповочное производство. 1982. № 6. С.6—11.

35. **Контактное** трение в процессах обработки металлов давлением А. М. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин и др. М.: Металлургия, 1976. 416 с.

36. **Кузнечно-штамповочное оборудование**/А. Н. Банкетов, Ю. А. Бочаров, Н. С. Добринскнй//М.: Машиностроение. 1982. 576 с.

37. **Кроха В. А.** Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник. М.: Машиностроение. 1980. 158 с.

38. **Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С.** Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. М. — Л.: Машиностроение. 1978. 335 с.

39. **Лабораторные** и производственные испытания новых технологических смазок для листовой штамповки/Ю. И. Артемьев, Л. Г. Латышева, И. Л. Бровин и др.//Кузнечно-штамповочное производство. 1979. № 3. С. 19—20.

40. **Матвеев А. Д.** Деформация при крутом знакопеременном изгибе листа с неизменной толщиной//Известия вузов. Машиностроение. М. 1984. № 1. С. 11—15.

41. **Матвеев А. Д.** Исследование пластического изгиба. Автоматизация процессов обработки металлов давлением в автомобилестроенни//Межвузовскнй сб. научных трудов. М.: МАМИ. 1983. С. 83—89.

42. **Матвеев А. Д.** Пластический изгиб места листа прн неизменной толщине//Известия вузов. Машиностроение. М. 1983. № 1. С. 12—18.

43. **Матвеев А. Д.** Пластический изгиб многослойного листа при заданном изменении толщины//Известия вузов. Машиностроение. М. 1983. № 2. С. 6—9.

44. **Михвленко Ф. П., Иванов Б. В.** Повышение стойкости разделительных штампов при штамповке танталовой фольги//Кузнечно-штамповочное производство. 1984. № 2. С. 16—17.

45. **Михаленко Ф. П.** Стойкость разделительных штампов. М.: Машиностроение. 1986. 228 с.

46. **Мовшович И. Я.** Система универсально-сборных штампов для листовой штамповки. М.: Машиностроение. 1977. 283 с.

47. **Могильный Н. И.** Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках. М.: Машиностроение. 1983. 192 с.

48. **Мошнин Е. Н.** Технология штамповки крупногабаритных деталей. М.: Машиностроение. 1973. 240 с.

49. **Мошнин Е. Н., Яиов С. И.** Методика определения силовых параметров машин для гибки труб с осевым сжатием//Кузнечно-штамповочное производство. 1975. № 12. С. 15—18.

50. **Новая** технологнческая смазка для процессов вырубки—пробнвки/И. Л. Бровин, Л. Г. Латышева, Ю. И. Зазулинский и др.//Кузнечно-штамповочное производство. 1979. № 3. С. 20—21.

51. **Новиков И. И., Портной В. К.** Сверхпластичность сплавов с ультрамелкнм зерном. М.: Металлургия. 1985. 168 с.

52. **Норицын И. А., Шехтер В. Я., Маисуров А. М.** Проектирование кузнечных и холодноштамповочных цехов и заводов. М.: Высшая школа. 1977. 423 с.

53. **Огородников В. А.** Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Кнев: Вища школа. 1983. 175 с.

54. **Ольша А. М.** Листовая штамповка на многопозиционных автоматах. М.: Машиностроение. 1980. 143 с.

55. **Организация** технологической подготовки производства при использовании штампов с применением полиуретана/М. А. Блинов, В. И. Пермяков, В. А. Ходырев и др.//Кузнечно-штамповочное производство. 1975. № 11. С. 41—43.

56. **Охрименко Я. М., Тюрин В. А.** Теорня процессов ковки. М.: Высшая школа. 1977. 295 с.

57. **Оценка** технологических смазок для глубокой вытяжки на машине Энгельгардта/А. В. Кольченко, Ю. И. Артемьев, М. В. Балышев и др.//Кузнечно-штамповочное производство. 1976, № 12. С. 16—17.

58. **Повышение** стойкости вырубных штампов из твердых сплавов/Н. Н. Олейник, А. И. Александрова, П. И. Кравчук и др.//Кузнечно-штамповочное производство. 1984. № 3. С. 20—21.

59. **Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. Н.** Сопротивление пластической деформацин металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия. 1983. 354 с.

60. **Попов Е. А.** Основы теории листовой штамповки. Учебное пособие для вузов. 2-е изд. перераб. н доп. М.: Машиностроение. 1977. 278 с.

61. **Применение** борирования при изготовленни вырубных штампов/В. П. Артюхов, П. И. Кравчук//Кузнечно-штамповочное производство. 1978. № 8. с. 48—49.

62. **Процесс** чистовой вырубки и смазки для него/А. И. Балин, Т. Н. Веретенова, В. М. Махин, В. И. Васин//Кузнечно-штамповочное производство. 1977. № 2.

63. **Пушкарев В. Ф., Мельник В. А.** Вибрационная зачистка среднеуглеродистых и легированных сталей//Кузнечно-штамповочное производство. 1969. № 2. С. 46—47.

64. **Рвзработка** и внедрение в производство технологии штамповки заготовок крутоизогнутых отводов энергетических трубопроводов/Н. И. Ромашко, Е. Н. Мошнин, В. С. Тимохин и др.//Кузнечно-штамповочное производство. 1982. № 2. С. 17—19.

65. **Романовский В. П.** Справочник по холодной штамповке. М. — Л.: Машиностроение. 1979. 520 с.

66. **Рудерман Я. О.** Эффективиость применения термически необработанных матриц для штамповки листовых деталей//Пути повышения эффективности холодноштамповочного производства. Л.: ЛДНТП. 1977. С. 25—28.

67. **Семенов А. П., Воронин Н. А.** О перспективе примеиения в машиностроении вакуумных ионно-плазменных и газотермических покрытий//Вестник машиностроения. 1982. № 1. С. 42—44.

68. **Смирнов О. М.** Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение. 1979. 184 с.

69. **Стоян Ю. Г., Гиль Н. И.** Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов. Киев: Наукова думка. 1976. 246 с.

70. **Стоян Ю. Г., Панасенко А. А.** Периодическое размещение геометрических объектов. Киев: Наукова думка. 1978. 175 с.

71. **Стройман И. М.** Холодная сварка металлов. М. — Л.: Машиностроение. 1985. 224 с.

72. **Тафт В. И., Шахназаров Ю. В.** Новые стали для штампов холодного деформирования и вырубки. Л.: ЛДНТП. 1978. 32 с.

73. **Теория** пластических деформаций металлов/Под ред. Е. П. Унксова и А. Г. Овчинникова. М.: Машиностроение. 1983. 598 с.

74. **Яковлев С. П., Чудин В. Н.** О вытяжке квадратных коробок из анизотропного материала//Кузнечно-штамповочное производство. 1982. № 5. С. 26—27.

75. **Оптимальное** двухрядное периодическое размещение заготовок с учетом технологических ограничений/ О. В. Усольцев, Л. Н. Верховский, Ю. Г. Стоян и др. Харьков: АН УССР. Ин-т проблем машиностроения. 1974. 148 с.

76. **Шевелев В. В., Яковлев С. П.** Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку. М.: Машиностроение. 1972. 136 с.

77. **Юдин Л. Г., Яковлев С. П.** Ротационная вытяжка цилиндрических оболочек. М.: Машиностроение. 1984. 128 с.

78. **Юдович С. З., Писков В. Ф.** О коэффициенте отбортовки при совмещенном процессе пробивки и отбортовки отверстий//Кузнечно-штамповочное производство. 1978. № 2. С. 10—11.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автоматы листоштамповочные многопозиционные 486 — Основные параметры 492 — с нижним приводом 486 — Основные параметры 492
Азотирование 471

Блоки универсальные — Примеры конструкций 353
Борирование 472

Ванадирование 473
Вдавливание (внедрение) 9
Винипласт — Зависимость механических свойств от температуры 312 — Особенности вытяжки 337
Выглаживание поверхности заготовки 9
Вырезка участка стенки полой детали 372 — Схема штампа 373
Вырубка 13 — Влияние СОТС на повышение стойкости штампов 342, 343 — Стойкость штампов 451, 452 — заготовок с пробивкой в них отверстий по последовательной схеме 366 — Схема вырубки с применением двух шаговых ножей 367 Схема раскроя 367 — при использовании эластичной среды 40—42 — тонколистовых заготовок без отверстий или с отверстиями 373 — Схема штампа 375
Вырубка деталей из неметаллических материалов — Качество изготовляемых деталей 317—319 — Предельная толщина материалов при штамповке без нагрева 317 — Применяемые материалы 315 — Профилограмма поверхности разделения 318 — Сопротивление сдвигу материалов при штамповке 316 — Схемы ножевых штампов 315, 316 — Усилие прижима 317
Вырубка чистовая 13 — Расчет усилий 50, 51 — Реверсивный способ 49 — Схема вырубки ступенчатым пуансоном 47 — Схема «прямой» вырубки 48, 50 — Схемы чеканки фасок, получения углублений и выступов 524 — Схемы штампов, 48, 375, 376 — Точность изготовляемых деталей 51—53 — Усилие вырубки 47
Высечка 13
Вытяжка деталей из неметаллических материалов 331, 332 — Особенности 337 — деталей коробчатой формы — Выбор способа построения контура заготовки 151—155 — Деформация (логарифмическая) при вытяжке по краю детали 150 — Предельный коэффициент вытяжки 150, 154 — Применение местного нагрева 155 — Распределение напряжений 145, 150 — Расчет геометрических параметров заготовки 151—153 — Формоизменение заготовки 149 — крупногабаритных облицовочных (кузовных) деталей — Последовательность отработки технологии 526—530 — листовой заготовки с дифференцированным нагревом — Предельные коэффициенты вытяжки цилиндрических стаканов из магниевых сплавов 309
Вытяжка многооперационная осесимметричная — Определение размеров перемычек и ширины ленты 140—142 — Предельный коэффициент вытяжки 136—139 — Припуски диаметра заготовки на обрезку 140 — Работа деформации 145 — Расчет силовых параметров 144—146 — Расчет числа операций, геометрических параметров заготовки и инструмента 139—144 — Рациональный раскрой ленты 140—142 — Скорость вытяжки в начале процесса 146 — Смазочные материалы 146 — Точность изготовляемых деталей 146—148 — Формоизменение заготовки 130—136 — Формулы для определения одностороннего зазора 147
Вытяжка 10, 13 — Определение конфигурации и размеров заготовок 434 — Последующие операции вытяжки при многооперационной штамповке 423, 424 — Построение технологического процесса 525 — Рекомендуемые СОТС 344—347 — Схема перегиба края заготовки на угол 90° с целью торможения листового материала 421 — Требования к штампам для первой операции вытяжки 418—423
Вытяжка осесимметричная — Зазор между цилиндрическими поверхностями матрицы и пуансона 124, 125 — Координаты центра тяжести дуги единичного радиуса 123 — Предельный коэффициент вытяжки 118—121 — Пример расчета технологических параметров 127—129 — Припуски на обрезку 122 — Работа деформации 126 — Расчет геометрических параметров заготовки и инструмента 121—125, 128 — Расчет радиусов кривизны рабочих кромок матрицы и пуансона 124 — Расчет силовых параметров 125, 126 — Скорости деформаций и напряжения 117, 118 — Формоизменение заготовки 116, 117
Вытяжка ротационная — Выбор инструмента 242, 249 — Выбор и расчет размеров заготовок 238, 242 — Выбор технологических параметров 249—251 — Геометрические параметры роликов 244—248 — Дефекты и способы их устранения 252 — Оборудование 254—256 — Процесс формоизменения 234, 235 — Расчетные коэффициенты 253 — Расчет силовых параметров процесса 251, 253, 254 — Способы 257 — Схемы процесса 236—238 — Типы изготовляемых деталей 239, 240 — Характеристики заготовок 241, 242
Вытяжка с утонением (вытяжка—протяжка) — Конструкции съемников 160, 161 — Материалы для изготовления матриц и пуансонов 161 — Пример расчета технологических параметров 170—173 — Расчет геометрических параметров заготовок 166, 1697 — Расчет размеров матрицы и пуансона 167—169 — Расчет силовых и технологических параметров 162 — Смазочные материалы и покрытия 163—165 — Типовой технологический процесс 169, 170 — Типы заготовок 157, 158 — Условия возникновения брака 161, 162 — Формоизменение заготовки 156, 157 — Формы пуансона и матрицы 158—160

Гетинакс — Деформация под воздействием постоянного напряжения при различных температурах 313 — Зависимость максимальной величины дефекта от технологических факторов 320 — Естественная усадка в зависимости от толщины штампуемого материала 322 — Коэффициенты термической усадки размеров деталей и упругое пружинение 322 — Особенности вырубки 317 — Размеры двусторонних зазоров при вырубке 324 — Режимы нагрева для штамповки 321 — Режимы нагрева перед гибкой 330 — Ширина перемычек при вырубке деталей 323
Гибка 9, 13 — Виды изготовляемых деталей 405 — Виды формоизменения заготовки 54, 55 — Ограничение кривизны, связанное с исчерпанием пластичности 83, 84 — Ограничение кривизны, связанное с локализацией деформации 84 — Примеры расчета технологических параметров 112—115 — Пружинение 82, 83 — Расчет заготовки 84, 85 — Расчет технологических параметров 56—83 — Способы снижения пружинения 525 — Точность процесса 111, 112
Гибка в штампах 111 — Пружинение детали при раскрытии штампа 97, 98 — Расчет сил взаимодействия заготовки со штампом 94—97 — Стойкость штампов 470, 471 — Схемы формоизменения 85—94 — Форма и кривизна опорных поверхностей матрицы и расстояние между ними, протяженность поверхностей для правки остаточной кривизны 99, 100
Гибка деталей типа хомутиков с механизацией съема детали — Схема штампа 413 — заготовки на 180° «до смыкания сторон» 410 — Схема штампа 411 — колец в геликондном штампе — Схема 414 — многогранного кольца путем последовательного изгиба заготовки — Схема штампа 411 — неметаллических материалов — Режимы нагрева 330, 331 — полок детали в заготовке, ранее подвергнутой вытяжке — Схема штампа 417 — реверсивная — Варианты построения

контура рабочих частей штампа 415 — Форма переходов штамповки втулки 414
— свертных втулок 414, 415
— стержней (тонкостенных труб) — Схемы 108
— стержня круглого сечения (толстостенной трубы) 415
— стержня проталкиванием через фильеры — Схема 109
— угольчика — Схема штампа, оснащенного шиберным питателем 411
— L-образная листовая — Схема штампов 406
— V-образная — Варианты сочетания рабочих частей штампа 405
— V-образная с матрицей-ползушкой и защемлением заготовки в горизонтальном положении — Схема 410
— U-образная листовая — Геометрия рабочих частей штампов в зависимости от высоты полок 409 — Определение усилия съема детали 408 — Способ устранения пружинения детали 408 — Схема ступенчатого изменения кривизны детали 408 — Схемы штампов 407, 410, 412
— U-образная с применением жесткого съемника — Схемы штампов 412
— U-образная заготовки из прутка с применением роликов в матрице — Схема штампа 412
Гибка круговая нецилиндрическая стержня круглого сечения — Расчет 76, 77, 80
— стержня с несимметричной относительно плоскости гибки формой поперечного сечения 80
— трубы круглого сечения — Применение несжимаемой оправки 77
— узкого стержня прямоугольного сечения — Расчет 75, 76
Гибку круговая цилиндрическая — Давления на граничных поверхностях 66
— Работа изгибающего момента, 67, 75
— Расчет изгибающего момента 56, 61
— Расчет осевой нагрузки 66, 67
— Расчет тангенциальной (продольной) силы 61—66
Гибка на валковых машинах — Схема процесса 101
— Схемы нагружения и формоизменения 101—104
Гибка некруглая (цилиндрическая и нецилиндрическая) под действием поперечной силы 80
— при относительно большом плече 80—82
— при относительно малом плече 82
Гибка труб коротких проталкиванием через тороидальный канал разъемной матрицы — Схема 110
— круглого сечения наматыванием на вращающийся копир — Схема 105
— круглого сечения наматыванием на неподвижный копир — Схема 107
— проталкиванием через ролики — Схема 109
— проталкиванием через фильеры — Схема 109
— протягиванием через трубу рогообразной оправки — Схема 110
— свободная — Схема четырехручьевого штампа 416
— с применением пневмоцилиндра для заготовки — Схема 417
— эксцентричным ротационным выдавливанием (раскаткой) — Схема 110
Детали облицовочные — Определение конфигурации и размеров заготовок для вытяжки 434
— стандартизованные — Пример применения в штампе 352
— с углублением в донной части — Схем изготовления 525
Деформирование поверхностное пластическое — Применение для повышения стойкости матриц и пуансонов 467
Дыропробиватель встроенный в штамп для вытяжки на прессе двойного действия — Схема 431
Завивка безоправочная 9
— спаренной петли — Схема штампа 414
— ушка петли — Схемы переходов 414
Зазор технологический — Диаграмма для цветных металлов и различных классов геометрических несовершенств 29
— при вырубке и пробивке 24—26
— при сдвиге 22—24
Закатка края 9
Зачистка 13, 33 — Классификатор операций 36 — Припуски 38, 40 — Точность изготовляемых деталей 51—53
— выглаживанием поверхности 38, 39
— деталей из неметаллических материалов — Схема 378
— детали в двухярусном штампе — Схема 378
— контура заготовок — Схема 377
— ранее пробитых отверстий — Схема штампа 378
— срезанием припуска 35, 37, 38
— штампами 33, 34
Зеркало матрицы 7
Калибровка 11, 13
Кольца опорные для шариковых и роликовых устройств — Конструкции 269
— Номограмма для определения ширины кольца 271
— Номограммы для определения размеров 270, 271
Контур проема матрицы 7
Коэффициент вытяжки предельный — Влияние уровня штампуемости материалов 120
— при вытяжке без прижима 118
— при вытяжке коробчатых деталей 150, 154
— при вытяжке с прижимом 119
— при многооперационной вытяжке 136—139
— среднестатический 119, 120
— цилиндрических стаканов из магниевых сплавов 309
Коэффициент долговечности 512
Коэффициент обжима предельный 200, 201 — Графоаналитическое определение 205 — Зависимость от температуры деформирования 306
— в штампах с противодавлением и без него 206, 207
— при обжиме в конической матрице 205
— при обжиме в сферической матрице 204, 205, 209
Коэффициент отбортовки предельный 191, 192
— для листового проката толщиной до 6 мм 195
— для сталей 193
— для титановых сплавов 194
Коэффициент Пуассона — Значения для некоторых материалов 389

Коэффициент раздачи предельный — Расчет 219
— Экспериментальные значения 219
Коэффициент трения — Значения для различных материалов и разных условий штамповки 347
Крепление штампов 348—352 — Минимально допускаемая толщина стенок в закаленных рабочих частях штампов при размещении деталей крепления 351
Лазерная резка — Применение для раскроя 287, 288
Лазерное упрочнение режущих кромок штампов 469, 470
Лазерные установки для резки листового материала 288, 289
Ленточно-ножевой штамп — Схема 316
Лотки-склизы — Примеры конструкций 383

Магнитно-импульсная сборка 285
— высокоскоростная 284
Материалы для изготовления штампов — Выбор 444, 446—450
— Механические свойства 445
Матрица для вытяжки с глубокой заходной частью — Конструкция 422
— цельнолитая для изготовления крупногабаритной детали 431
Матрицы для разделительных штампов — Варианты исполнений рабочей полости 396, 397
— Геометрические параметры рабочих элементов 396
— Пример армирования пластинами из бейнитных сталей 402
— Рекомендуемая высота рабочего пояска 397
— Толщина стенок 404
— Экспериментальные значения стойкости 454
Матрицы для разделительных штампов вставные (быстросменные) — Примеры применения 404
— малогабаритные с трудиодоступными участками, требующими применения секций — Схемы 399
— секционные 399 — Крепление 402 — Способы предотвращения секций от смещения 400 — Схема к определению относительной устойчивости секции 401
Матричное кольцо 7
Машины валковые — Назначение 100 — — Схемы работы 101 — гибочные Схемы гибки 104—111
— для гибки с растяжением 502 — Основные параметры 501
— для резки и гибки двухроликовые с горизонтальными шпинделями 502 — Основные параметры 500
— обтяжные 502 — Основные параметры 501
Машины листогибочные ротационные — Выбор 518
— с поворотной гибочной балкой и ЧПУ 497 — Основные параметры 498
— с поворотной гибочной балкой — Основные параметры 497
— с поворотными прижимной и гибочной балками и ЧПУ 499 — Основные параметры 498
— трехвалковые 499 — Основные параметры 498
— четырехвалковые — Основные параметры 499
— четырехвалковые с ЧПУ 502 — Основные параметры 499
Машины трубогибочные — Выбор 518
— с гидравлическим приводом 502 — Основные параметры 501
— с механическим приводом 502 — Основные параметры 500
— с программным управлением 502 — Основные параметры 501
Модуль упругости — Значения для некоторых материалов 389
Молоты листоштамповочные воздушные 486 — Основные параметры 494
— паровоздушные простого действия — Выбор 518

Накладки, применяемые при разделении неметаллических материалов — Материалы 44
Направляющие пары скольжения — Типовые конструкции 354
Ножевой штамп для вырубки (просечки) — Схема 315
Ножницы — Типы и применение 34, 35
— высечные 486 — Основные параметры 495
— гильотинные — Раскрой материала 287
— дисковые — Выбор 518
— кривошипные с наклонными ножами — Выбор 518
— листовые двухдисковые с наклонными ножами 492 — Основные параметры 495
Нож шаговый 367, 368
Обжим 10—13 — Виды дефектов, возникающих при потере устойчивости заготовки 202
— Предельный коэффициент обжима 200—208
— Пример расчета технологических параметров 214—216
— Работа деформации 212, 213
— Расчет геометрических параметров заготовки и инструмента 208—212
— Расчет силовых параметров 212
— Рекомендации по выбору конструктивной схемы штампа 213
— Схема внешних и внутренних сил, напряжения 200, 202
— Схемы штампов 207
— Формоизменение заготовки 200, 201

Обжим трубной заготовки — Схема штампа для обжима труб с нагревом 305
Оболочки цилиндрические — Выбор и расчет заготовок 260, 261 — Графики зависимости неравномерности деформации от степени утонения стенки 276
— Значения предельной степени обжатия стенок 261
— Классификация 257—260
— Конструкции устройств для вытяжки 261—274
— Номограмма для определения размеров заготовок 262
— Номограмма для определения шероховатости поверхности 275
Обрезка — Схемы процесса 523
— конца трубы — Схема штампа 381
— края (припуска) по периметру коробки 371
— края с применением матрицы — Схема штампа 372 — Усилие пружин 372
— по контуру детали — Схемы штампов 375
— частичная плоской заготовки 372 — Схема штампа 374

Обтяжка 10, 13
— осесимметричная 186 — Расчетные схемы 189—190
— широким листом инструмента с поверхностью двойной кривизны 181—186— Расчетные схемы 186
— широким листом инструмента с цилиндрической поверхностью 174—181 — Расчетные схемы 175, 176, 179, 181
Ограничитель закрытой высоты переналаживаемый по высоте — Конструкция 384
Оправки для гибки — Виды 106 — Области применения 106
— для ротационной вытяжки — Выбор материала 272 — Приспособление для полной фиксации заготовки на оправке 274 — Способ крепления 273
Осадка 7
— труб — Схема штампа 307
Отбортовка 10, 13 — Предельный коэффициент отбортовки 191—193 — Расчет геометрических параметров заготовки и инструмента 193, 195, 196 — Расчет силовых параметров 196 — Схема процесса 192 — Формоизменение заготовки 191
— кольцевых заготовок 192 — Формоизменение заготовок 193
— некруглых отверстий 196, 197
— отверстий 310
— отверстий на трубных заготовках 137
— с утонением 198, 199
Отрезка заготовок безотходная 357

Перегиб 9
Перетяжные пороги — Основные элементы 421
— ребра — Конструкции и схемы их применения 419 — Рекомендуемый вариант установки 420
Пластики слоистые — Особенности вытяжки 337
— Режимы нагрева перед гибкой 330
Пластичность листового металла 15—18
Поверхность разделения — Значения коэффициентов геометрических несовершенств 28
— Классификация по классам геометрических несовершенств 27
Покрытия износостойкие — Способы повышения стойкости штампов 471—473
Полиуретан — Применение 42
Правка 10, 13
Прессы-автоматы вырубные быстроходные 486 — Основные параметры 493
— для чистовой вырубки (кривошипные и гидравлические) — Выбор 517, 518
— для чистовой вырубки 486 — Основные параметры 494
— многопозиционные — Типовой комплект штампов 435—437
— перфорационные 486 — Основные параметры 494
Прессы винтовые — Выбор 518
— гибочно-штамповочные горизонтальные 497
— для пробивки отверстий 475 — Основные параметры 489
— координатно-револьверные 484 — Основные параметры 489
— одностоечные гидравлические 484 — Основные параметры 490, 491
Прессы гидравлические листоштамповочные — Выбор по усилию 517 — Проверка по технологическим параметрам 517
— двойного действия колонные 484 — Основные параметры 490
— одностоечные отбортовочные с ЧПУ 486 — Основные параметры 491
— простого действия рамные с гидроподушкой 484 — Основные параметры 490, 491
Прессы двойного действия закрытые двухкривошипные 475 — Основные параметры 488
— однокривошипные 475 — Основные параметры 487
— четырехкривошипные 475 — Основные параметры 488
Прессы кривошипные — Выбор по технологическим параметрам 508, 509
— Выбор по усилию 509—513
— Коэффициент полезного действия рабочего хода, коэффициенты энергопотребления и жесткость 516, 517
— Коэффициент шатуна 514
— Проверка по длительности технологического цикла 514—517
— Проверка по скорости ползуна в начале рабочего хода 513
Прессы листогибочные гидравлические — Выбор по усилию 517 — Проверка по технологическим параметрам 517
— гидравлические с ЧПУ 497 — Основные параметры 496
— кривошипные 497 — Основные параметры 496
Прессы простого действия двухкривошипные закрытые 474 — Основные параметры 485
— двухкривошипные открытые 474 — Основные параметры 484
— однокривошипные закрытые с круговым исполнительным механизмом 474 — Основные параметры 484
— открытые 474, 475 — Основные параметры 476—481
— четырехкривошипные закрытые 474 475 — Основные параметры 486
Прижим прерывного действия — Применение в штампе для разделения полосы 358
Прижим-тормоз клинорычажный постоянного действия — Схема 359
Пробивка отверстий — Влияние СОТС на повышение стойкости штампов 342, 343 — Стойкость штампов 451, 452
— в двух полках детали — Схема штампа 371
— в неметаллических материалах — Качество изготовляемых деталей 317—319 — Схемы пробивки пуансонами с предразрушаемыми выступами 319
— в трубе с применением подпружиненной матрицы-оправки 371 — Максимальное усилие съема детали 370
— в цилиндрической детали — Схема штампа с поворотным механизмом 371
— в штампе с полужестким съемником — Схема штампа 369
— расположенных под углом в штампе с пуансонами, встроенными в прижиме 369 — Схема штампа 370
— расположенных под углом в штампе с пуансонами, прикрепленными к ползушкам — Схема штампа 370
Пробивка 13 — Построение технологического процесса 523, 524
— при использовании эластичной среды 40—42
— чистовая 13 — Расчет усилий 50, 51— Схемы процесса 47—50 — Точность изготовляемых деталей 51—53 — Формы пуансонов со специальной геометрией рабочих частей 379
Проколка 13
Просечка 13
Пружинение 82, 83, 97, 98 — Способы уменьшения 524
Пуансоны для разделительных штампов — Геометрия режущих граней 397 — Рациональные формы режущей части 398 — Способы крепления 398 — Схема к расчету на прочность 404
— быстросменные — Способы крепления 403

Работа сдвига 32, 33
Раздача 13 — Виды потери устойчивости заготовки 218
— Предельный коэффициент раздачи 218—220
— Пример расчета технологических параметров 225, 226
— Расчет геометрических параметров заготовки и инструмента 221, 222
— Расчет работы деформации 223
— Расчет силовых параметров 222, 223
— Рекомендации по выбору конструктивной схемы штампа 223, 224
— Совмещение обжима и раздачи 224, 225
— Схема внешних и внутренних сил, напряжения 216—218
— Формоизменение заготовки 216
Раздача трубных заготовок — Схема штампа 306
Разделение материала 11
Разрезка 13
— чистовая 45 — Принципиальная схема 46
Раскрой материала 14, 15 — Выбор полюса заготовки 300
— Выбор схемы раскроя 292—297
— Выбор схемы раскроя с помощью ЭВМ 298
— Графоаналитический способ плотного размещения заготовок 300—303
— Классификация вариантов 299
— Оборудование 287, 288
— Операции 287
— Определение ширины полосы 292
— Построение эквидистантной фигуры 300
— Размеры перемычек 289—291
— Расчет норм расхода материала 292, 294—297
— Совершенствование конструкции штампуемых деталей с целью снижения расхода материала 303
— Схемы 288, 289
— Схемы расположения деталей произвольной конфигурации 296
— Типы раскроя 293, 294
Растяжение 7
Резина — Применение 42
Резка гидравлическая листовых пластиков — 314, 315
Резка на ножницах 33, 313, 314 — Оборудование см. *Ножницы для резки*
Ролики для ротационной вытяжки — Номограмма для определения давления 267 — Номограмма для определения размеров 268 — Схема для определения размеров 267 — Типовые конструкции 267
— конических деталей и деталей с криволинейной образующей — Геометрические параметры 244—246
— цилиндрических деталей — Геометрические параметры 247, 248
Роликовое устройство см. *Устройство для ротационной вытяжки*
Ротационная вытяжка тонкостенных цилиндрических деталей (оболочек) — Выбор и расчет размеров заготовок 260, 261
— Выбор технологических параметров 274—276
— Классификация оболочек 257—260
— Конструкции устройств для вытяжки 261—267
Сборка гибкой 277, 280
— закаткой роликом 277
— запрессовкой 277, 280
— импульсной обработкой — Способы соединения 284—286
— клепкой 279
— обжимом 279, 282
— осадкой 277, 279
— ротационным локальным деформированием (вальцовкой), 285, 286
— самопробивающейся гайки с панелью 278, 281
— упругим и упругопластическим изгибом 277
— холодной сваркой — Способы соединения 279—284
— холодной штамповкой — Способы соединения 277, 278 — Степень деформации 282

Сборка-штамповка взрывом 286
Сбрасыватель щелчковый пробивного штампа — Схема работы 369
Сдвиг 7, 8 — Влияние технологического зазора на формирование поверхности разделения 22—24
— Распределение деформации 19—22
Сепараторы для шариковых и роликовых устройств 271 — Конструкции 272
— Номограмма для определения размеров 273
— Расчет размеров 273
Силы трения, возникающие в процессе штамповки 339 — Коэффициент трения 340
Скручивание 11, 13
— прямоугольной заготовки на угол 90° Схема штампа 417
— стержня квадратного сечения 228 — Схемы формоизменения 229, 230
— стержня круглого сечения — Работа деформации 227, 228 — Расчет силовых параметров 227 — Схемы формоизменения 228, 229
— тонкой полосы при неизменной длине 230 — Расчет силовых параметров 231—233
Слюда — Конструкция совмещенного штампа для вырубки — пробивки 326
— Особенности вырубки и пробивки 325—327
— Стойкость рабочих частей штампа в зависимости от зазора 327
Смазочно-охлаждающие технологические средства — Группы 340
— Наполнители 341
— Номограмма для определения динамической вязкости 346
— Результаты лабораторных испытаний 341
— Рекомендуемые области применения и составы 345
— Свойства 340, 464
— Способы нанесения и удаления 344
Смазочно-охлаждающие технологические средства для вырубки и пробивки — Повышение стойкости штампов 342—344

— для высокоскоростных процессов штамповки 346, 347
— для вытяжки деталей из различных материалов 345, 346
Сопротивление сдвигу 8, 30
Спрямление 9
Станки для ротационной вытяжки — Технические характеристики 254—256
Стеклопластики — Особенности вырубки и пробивки — 327, 328
— Усилие деформирования при различных режимах штамповки 328
Стойкость штампов 451 — Методы расчета 456—459
— Ориентировочные данные плановой стойкости 458
— Применение износостойких покрытий 471—473
— Применение СОТС 342—347, 463
— Характеристика условий работы режущих кромок штампов для вырубки и пробивки 451—453
Съемники — Конструкции 274

Текстолит — Естественная усадка в зависимости от толщины 322
— Коэффициент термической усадки размеров деталей и упругое пружинение 322
— Особенности вырубки 317
— Особенности вытяжки 337
— Размеры двусторонних зазоров при вырубке 324
— Режимы нагрева для штамповки 321
— Режимы нагрева перед гибкой 330

Термопластики — Агрегатные состояния 312
— Зависимость механических свойств от температуры 311, 312
— Особенности вытяжки 337
— Режимы нагрева перед гибкой 331
— Режимы нагрева перед формовкой 331
— Типовые диаграммы 311, 312
Технологический процесс листовой штамповки — Примеры применения последовательной штамповки 521
— Примеры рационального раскроя 522
— Этапы разработки 519—523
Технологичность изделия 15, 519
Трубные заготовки — Выворачивание внутрь или наружу, оборудование дна или фланца 308 — Обжим 305 — Осадка 307 — Раздача 306 — квадратного сечения — Схема разрезки (с отходом) 362
Упрочнение листового материала 15—18
Уровень штампуемости для сталей 08кп, 08пс 121
Усилие проталкивания заготовки после вырубки или отхода после пробивки через рабочую полость матрицы 393 — Схема к определению критического напряжения штампуемого материала, находящегося в окне матрицы 394
— сдвигу 31
— съема штампуемого материала или отхода с разделительного штампа 389—391
Устройство для ротационной вытяжки — Конструкции 261—266
— самоцентрирующееся для фиксации полосы (ленты) 368

Фибра — Особенности вырубки 317
Фланцовка 11
Формовка неметаллических материалов — Режимы нагрева листовых термопластиков 331
— вакуумная — Схемы негативного и позитивного процессов 332, 335
— комбинированная — Способы 334 — Схема скользящего метода 336
— пневматическая в жестких формах 333
Формовка 13 — Способы снижения пружинения 525
— деталей в состоянии сверхпластичности — Схема штампа 309
— местная 10
— рельефная — Схема штампа 310
Формоизменение заготовки при вытяжке деталей коробчатой формы 149
— при вытяжке осесимметричной 116, 117
— при вытяжке—протяжке 156, 157
— при многооперационной вытяжке 130—136
— при обжиме 200, 201
— при обтяжке 174—190
— при отбортовке 191—193
— при раздаче 216
— при скручивании 227—230

Хромирование 472

Целлулоид — Особенности вытяжки 337

Чеканка фасок — Схема 524

Шаблоны для разделения материала 43—45
Шариковые устройства см. *Устройство для ротационной вытяжки*
Штамп геликоидный — Схема штамповки колец 414
— двухярусный для вырубки и зачистки деталей — Схема 378
— для зачистки торцов заготовки — Схема 377
— для правки (калибровки) ступенчатой детали — Схема 424
— для разрезки круглой трубы — Схема 381
— для разрезки ранее вынутой детали — Схема 380
— для отрезки заготовок переналаживаемый — Схема 359
— для скручивания прямоугольной заготовки на угол 90° — Схема 417
— для снятия лысок на поверхности полой детали — Схема 373
— с применением протяжек — Схема протягивания шпоночного паза 382
— твердосплавный — Стойкость 460— 462— Технико-экономическая эффективность применения 462
Штамп для вырубки последовательного действия одновременно двух деталей — Схема 368
— последовательного действия с ловителем — Схема 366
— с жестким съемником — Высота просвета между матрицей и съемником 360
— с консольным (козырьковым) съемником — Схема к расчету съемника 361
— с пружинным съемником — Конструктивные элементы 362
Штампы для вытяжки — Пример применения роликов из полиуретана 434 — Стойкость 470, 471
— выпуклой детали, когда допускается выполнять матрицу с вертикальными стенками 422
— деталей типа коробок, стаканов — Схемы 422, 423
— детали, имеющей вертикальные стенки и плавно скругленные участки — Схема 429

— крупногабаритной облицовочной детали (типа кузова, кабины) — Схемы 424—428, 432 — Схема применения в прижиме перетяжных ребер 430
— крупногабаритный с механизацией подъема штампуемой детали — Схема 433
— реверсивной (выворотной) — Схема 423
— с гладким прижимом (складкодержателем) — Схема 418
— с жестким прижимом — Схема 418
— с перетяжными порогами — Схема 430
— с перетяжными ребрами — Схема 419
— **Штамп для обрезки** — Материалы для изготовления 455
— конца трубы 381
— края вертикальных стенок коробок — Схема 372
— ранее отформованных заготовок — Схема 375
— угла в заготовке — Схема 374
Штамп для пробивки отверстий — Материалы для изготовления 455, 456 — Характеристика условий работы режущих кромок 451, 452
— разделительный с поворотным механизмом для цилиндрических деталей — Схема 371
— с полужестким съемником — Схема пробивки 369
Штамп для чистовой вырубки — Зазор между матрицей и пуансоном 377—Схема сборки матрицы (пуансона) с обоймой и нижней плитой 399
— закрепленный за универсальным прессом, прошедшим модернизацию — Схема 376
— с конической посадкой рабочих частей— Схема 375 — Форма и размеры клинового ребра 376
— с цилиндрической посадкой рабочих частей — Схема 375
Штамповка листовая — Виды формоизменения 7—11
— Выбор материала для изготовления штампов 442—450
— Выбор оборудования 503—518
— Масштаб производства 443
— Обрабатываемые материалы 7
— Технологические параметры 503—508
— Факторы, ограничивающие формоизменение 11, 12
Штамповка листовая неметаллических материалов — Выбор перемычек при вырубке и пробивке 323 — Особенности деформирования 311—313 — Разделительные операции 313—329 — Расчет исполнительных размеров матриц и пуансонов 321 — Формоизменяющие операции 330—338
— с местным нагревом 304 — График зависимости временного сопротивления от температуры испытания 305 — Способы 305—310
— тонкостенных труб с нагревом — Схема 308
Штампо-сборочная операция 14
Штамп совмещенного действия для вырубки — пробивки — Конструкция штампа с автоматическим упором 363 — Разновидности способов связи верхнего толкателя пресса со штампом 364—Способы удаления заготовок 364
— для гибки и формовки ребра жесткости — Схема 438
— для двухрядной последовательной штамповки с крючковой подачей — Схема 443
— для отрезки заготовки и свертывания втулки — Схема 440
— для последовательной вытяжки в ленте колпачка дном вверх — Схема 442
— для последовательной вытяжки деталей типа пистона с автоматической роликоклиновой подачей — Схема 442
— для последовательной штамповки скобы — Схема 441
— для пробивки, отрезки и гибки — Схема 438
— для проколки и отбортовки отверстия — Элемент конструкции 439
— с отлипателем вырубленных деталей от выталкивателя — Конструкция 365
— с применением рабочих частей, выполненных из стальной ленты — Схема 375
— трехрядный с применением запрессовки вырубленных деталей с ленты 365, 366
Штампуемость — Определение 12, 13
— Основные параметры 15—18
— Показатели 13
Штампы для вырубки — Материалы для изготовления 455, 456
— Повышение стойкости 468—470
— Результаты стойкостных испытаний 463
— Схема вырубки с возвратом детали в ленту 365
— Схема соединения пуансона со штампуемым материалом во время съема 390
— Усилие съема штампуемого материала 388—391
— Характеристика условий работы режущих кромок 451, 452
Штампы для гибки — Стойкость 470, 471
— L-образной (одноугловой) — Примеры 411 — Схемы 406
— V-образной — Варианты сочетания рабочих частей 405 — Примеры 410
— U-образной — Геометрия рабочих частей штампа в зависимости от высоты полок 409 — Примеры 410—412 — Способ устранения пружинения детали при гибке 408 — Схема 407 — Схема к определению усилий съема детали с пуансона 408 — Схема ступенчатого изменения кривизны изгиба детали 408
— Z-образной — Схема 412
— деталей типа хомутиков — Схема 413
— короткой трубы с введением оправок — Схема 111
— короткой трубы — Схема 111
— полки детали в заготовке, ранее подвергнутой вытяжке — Схема 417
— реверсивной (штамповка свертных втулок) — Варианты построения рабочих частей 415 — Форма переходов штамповки втулки 414
— трубы с применением пневмоцилиндра для зажима заготовки — Схема 417
Штампы последовательного действия разделительные — Каскадное (ступенчатое) расположение пуансонов 388
— Примеры размещения рабочих частей при малом расстоянии между отверстиями в детали 388
— Расчет усилия съема штампуемого материала 389
— Схема нагружения пуансонов при съеме с них штампуемого материала 388
Штампы разделительные — Выбор материала для рабочих частей и их стойкость 452—456
— Методы расчета стойкости 456—459
— Способы повышения стойкости 463—470

— Схема рабочих частей 26
— Требования 355, 356
— Электроэрозионная обработка 467, 468
— Элементы крепления 348—354
Штампы разделительные для крупногабаритных кузовных деталей — Конструкция ограничителя закрытой высоты 384
— Планировка рабочих позиций при последовательной штамповке часто расположенных отверстий в ленте 386
— Призматические направляющие в сочетании с цилиндрическими колонками 384
— Примеры конструкций лотков-склизов с трением качения 383
— Расположение секций пуансонов относительно секции матрицы 382
— Типовая компоновка основных деталей 383
Штампы разделительные для неметаллических материалов — Расчет стойкости 328—330
Штапол — Особенности штамповки 337, 338
— Физико-механические характеристики 338
Электрогидравлическая импульсная сборка 286

Электроэрозионное легирование — Зависимость удельного времени легирования от энергии импульсов 466
— Применение для повышения стойкости матриц и пуансонов 465, 466

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Колонка, строка	Напечатано	Должно быть
		Том 1	
4	6-я сверху	Донеиберг	Деневберг
6	Правая, 3 и 4-я сверху	Донеиберг	Деневберг
44	Рис. 18, подрисуночная подпись	на копре (*б*):	на копре (*б*), где ε, % — относительная осадка
155	Правая: 7-я сверху	ε_p	ε_{pp}
156	Левая, 18-я снизу	(пределом текучести)	(пределы текучести)
157	Левая: 12-я снизу	ε_{i0}	ε_{i0}
	14-я снизу	ε_{i0}	ε_{i0}
	Правая, 19-я сверху	ε_{i0}	ε_{i0}
159	Левая: 14-я сверху	ε_{ip}	ε_p
	16-я сверху	ε_p	ε_{pp}
231	Правая, 12-я снизу	табл. 57.	табл. 5—7.
443	Левая, 14-я снизу	$D_{оср}$	$D_{заг.\ ср}$
	Левая: 19 и 20-я снизу	$y = \frac{F_{заг}}{F_к} = \frac{D^2_{заг} - d^2}{D^2_{пок} - d^2_{пок}}$	$y = \frac{F_{заг}}{F_{пок}} = \frac{D^2_{заг} - d^2_{заг}}{D^2_{пок} - d^2_{пок}}$
	Правая, 14 и 15-я снизу	$\frac{F_{заг}}{F_к}$	$\frac{F_{заг}}{F_{пок}}$
444	Рис. 7	H_0	$h_{заг}$
	Правая: 10-я снизу, 24-я снизу	1,7·10 (1 + вытяжки	1,7·1 (1 + протяжки
445	Левая: 7-я снизу 24-я снизу	$\frac{600 \cdot 10^{-5}}{l \cdot 10^{-5}}$	$\frac{600 \cdot 10^{-6}}{l \cdot 10^{-6}}$
	Правая, 8-я и 9-я строки снизу	прошивки	прошивки
446	Правая, 3-я снизу	$\ln \frac{D}{d}$).	$\ln \frac{D}{d}) \cdot 10^{-6}$,
447	Левая, 18-я снизу	H	$H \cdot 10^{-6}$
	Правая, 9-я снизу	$\cos \alpha \cdot 10$	$\cos \alpha \cdot 10^6$
476	Левая, 10 и 11-я снизу	$G_{уч}$	$G_{уг}$

Страница	Колонка, строка	Напечатано	Должно быть
480	Правая, 2-я снизу	12,5	12
	6-я снизу	$G_{уч}$	$G_{уг}$
	17-я снизу	$\pi 12^2$	$\pi 12{,}5^2$
481	Левая: 8 и 9-я сверху	$\frac{129 + 3{,}8}{0{,}975} = 137$	$\frac{129 + 3{,}6}{0{,}975} = 136$
	13-я сверху	137	136
	Левая, 2 и 3-я снизу	$L_0 = \frac{4V_{заг}}{\pi D^2_{заг}} = \frac{4G_{заг}}{\pi\gamma D^2_{заг}} = \frac{4 \cdot 137}{\pi 24^2 \cdot 7{,}85}$	$L_{заг} = \frac{4V_{заг}}{\pi D^2_{заг}} = \frac{4G_{заг}}{\pi\gamma D^2_{заг}} = \frac{4 \cdot 137000}{\pi 24^2 \cdot 7{,}85}$
481	Левая, 4-я снизу	24	22,8
	Правая, 20-я снизу	l = 480 мм	l = 545 мм
482	Рис. 27, в	360×500	960×500
483	2-я снизу	⌀ 710	⌀ 740
485	2-я графа справа:		
	6-я снизу	2385	238,5
	8-я снизу	865	86,5
487	2-я графа справа:		
	6-я снизу	3745	374,5
	8-я снизу	865	86,5
489	2-я графа справа 8-я снизу	865	86,5
490	3-я графа слева, 6-я сверху	слитка на ⌀ 450 мм	слитка на ⌀ 430 мм
491	Левая, 20-я сверху	$G_{прнб}$	$G_{проб}$
	Правая: 8-я сверху	41, %	4,1 %
	9-я сверху	2,7 на пробу	2,7 % на пробу
		Том 2	
15	Рис. 4	$+2{,}5$ $-1{,}6$	$+2{,}5$ $-1{,}5$
25	Левая, 18-я сверху	$81^{+0{,}5}_{-5{,}0}$	$81^{+0{,}5}_{-1{,}0}$
50	Табл. 4, графа 3, 1-я снизу	металла	металла (*б*)
73	Левая, 9-я сверху	$l_{разв}/l_{ср} > 2{,}5$	$l_{разв}/b_{ср} > 2$
79	Правая, формулы (45)—(47)	$V_{зг}$	$V_{зг}$
88	Табл. 13, графа 3, 8-я сверху	$S > H_1$	$S_1 \geqslant H_1$
99	Табл. 14, п. 13, верхний эскиз	$R = 0{,}2_{зг} + 5$	$R = 0{,}2D_{зг} + 5$
155	Левая, 2-я сверху	$V_{п.\ о} = V_п + V_з$	$V_{п.\ о} = V_п + V_0$
172	Рис. 78, подрисуночная подпись	*а* — поковка; *в* — переход;	*а* — переход; *в* — поковка;
174	Рис. 80, подрисуночная подпись	*а* и *б* — штамп; *в* — чертеж поковки	*а* — чертеж поковки; *б* и *в* — штамп
175	Рис. 81, подрисуночная подпись	*а* и *б* — штамп *в* — чертеж поковки	*а* — чертеж поковки; *б* и *в* — штамп
184	Левая, 8-я снизу	отделена	удалена
242	Табл. 1, графа 3, 6-я сверху	приводят	проводят
252	7-я сверху	Высадкой и штамповкой в матрицах выдавливанием в пуансоне	Высадкой и прошивкой в матрицах, выдавливанием, в пуансоне
260	Табл. 5, графа 1, 3—5-я сверху	$c \times 42^\circ$	$c \times 45^\circ$
262	Табл. 6, п. 2, графа 3 Эскиз	$r + R > h$	$r_1 + R > h_1$
263	Табл. 6, 10-я сверху, графа 2	U	u
272	Правая, 29-я снизу	d_c	$d_c\,(n-1)$
277	Табл. 11, графа 2, 6-я снизу	$V_н = UV_ф$	$V_н = uV_ф$
287	Табл. 16, графа 3, 7-я сверху		

Страница	Колонка, строка	Напечатано	Должно быть
296	Левая, 8-я снизу	$\leqslant \sqrt{D^2 + 0{,}75\,d^2}$	$\leqslant \sqrt{D^2 + 0.75d^2}$
301	Табл. 21, графа 1, 5-я сверху	повтором	поворотом
304	Табл. 24, графа 2, Эскизы	d_1	$d_м$
310	Табл. 26, графа 2, Эскизы	b	b_1
	Верхний эскиз	Нет обозначения радиусов r_1, r_2 и r_3	см. r_1, r_2 и r_3 в верхнем эскизе с. 309
	Нижний эскиз	Неправильно проставлен радиус r_1	см. r_1 на эскизах с. 309
368	Левая, рис. 25	Нет обозначения осн (стрелка вправо)	Стрелка вправо — ось β
376	Правая, 4-я снизу	вальца	валка
380	Правая, 3 и 4-я снизу	четырехвальцовых	четырехвалковых
387	Левая 2-я сверху	$\left(1 - \frac{0{,}249 + 0{,}05}{2 \cdot 0.3}\right)$	$\left(1 - \frac{0{,}249 - 0{,}05}{2 \cdot 0{,}3}\right)$
	Левая 8 и 9-я сверху	$0{,}042 \times (4{,}2\ \%)$;	$0{,}042\ (4{,}2\ \%)$;
388	Правая, 12 и 13-я сверху	усилия протаскивания заготовки	усилия протаскиваемой заготовки
393	Рис. 55, подрисуночная подпись	*б* — вскрытие осевой рыхлости	*б* — вскрытие осевой полости
440	Правая, 4-я строка сверху	Заготовка *3* заживается	Заготовка *3* зажимается
448	Левая, 7-я строка сверху	$p = \frac{p_1}{2\pi k d_1 l}$	$p_1 = \frac{P_1}{2\pi k d_1 l}$
450	Левая, 4-я строка текста сверху	Усилие в садки	Усилие высадки
488	Левая, 5-я строка снизу	централизована	центрирована
586	Правая, 11 строка снизу	Журб С. Л.	Жубр С. Л.
	17 строка снизу	Журб Л. Н.	Жубр Л. Н.
		Том 3	
35	Название главы 2	параметры схемы	параметры, схемы
97	Левая, 15-я снизу	$1 \div 1.5)\ t$	$(1 \div 1{,}5)\ t$
98	Левая, 2-я сверху	ε_i	ε
102	Левая, 14-я снизу	отверстиями	отростками
102	Правая, 12, 13-я сверху	Номинальная	Минимальная
223	Правая, рис. 21 подпись	d_{0*}	a_{0*}
224	Правая, рис. 24 по осям:		
	ординат	b^*	b
	абсцисс	ψ	$\varepsilon_в$
237	Левая, 25-я сверху	продукции 3 —	продукции —
278	Правая, 9-я снизу	(29	(2,9
260	Левая, рис. 5 по оси ординат	20 40	200 400
283	Правая, 2, 3-я сверху	$\frac{h}{h_0}$	$\frac{h_0}{h}$
284	Левая, формула (22)	$\sigma_в$	$\delta_в$
290	Правая формула (53)	$\sigma_{s1}\frac{2H}{D} + \sigma_{s3}\frac{4\mu_1 l}{d}$	$\sigma_{s3}\frac{2H}{D} + \sigma_{s1}\frac{4\mu_1 l}{d}$
291	Табл. 8, графа 1	Способ резки	Способ обрезки
344	Рис. 13, *б*	φ	$\varphi_к$
347	Правая, 1-я сверху	C_7	C_7
365	Табл. 1, номер варианта 7, графа 3	ψ^*	ψ

Уточнение. На стр. 278 в формулах (5)—(7) деформации в %, а в формулах (8) и (9) в относительных единицах.

На стр. 281, рис. 8 значения ε ниже 0 со знаком минус

Справочник «Ковка и штамповка»
т. 1 заказ 140, т. 2 заказ 63, т. 3 заказ 113