

Н.И. НЕСТЕРОВ

ОПЕРАЦИИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
2022

FreeBusta is knowledge
without borders!



УДК 621.98.04(075.8)
Н56

Нестеров, Н.И.

Н56

Операции листовой штамповки: учебное пособие / Н.И. Нестеров. – СПб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2022. – 168 с.
ISBN 978-5-907324-78-7

Изложены основные положения об операциях листовой штамповки, штампуемых материалах и видах их контроля, о способах повышения пластичности штампуемого материала в условиях различных операций. Приведены сведения о применении жидкости, эластичных материалов для листовой штамповки. Рассмотрены технологические требования к деталям, изготавливаемым листовой штамповкой.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Машиностроение» (профиль «Машины и технология обработки металлов давлением») или изучающим методы обработки металлов.

УДК 621.98.04 (075.8)

Рецензент зав. каф. «Технология и производство артиллерийского вооружения», д-р техн. наук, проф. *К.М. Иванов*

*Утверждено
редакционно-издательским
советом университета*

ISBN 978-5-907324-78-7

© Н.И. Нестеров, 2022
© Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, 2022



ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных видов обработки металлов давлением (ОМД) является листовая штамповка, или штамповка из листовых заготовок. Холодная листовая штамповка (ХЛШ) отличается от других способов ОМД тем, что один из размеров обрабатываемых заготовок (толщина) существенно меньше двух других: длины и ширины.

Листовая заготовка может быть металлической или неметаллической и полученной прокаткой, прессованием или другими методами ОМД.

Номенклатура изделий, получаемых таким способом, весьма многочисленна и разнообразна и включает в себя как плоские, так и пространственные детали различных габаритов (от сотых долей до десятка миллиметров). Это позволяет создавать облегченные конструкции высокой жесткости и прочности. Кроме того, в процессе штамповки происходит упрочнение (наклеп) материала, что дает возможность получать изделия более высокой прочности по отношению к исходной заготовке.

В зависимости от массы и толщины заготовки применяется холодная или горячая листовая штамповка. В первом случае штампуют заготовки толщиной не более 10...15 мм. Заготовки большей толщины перед штамповкой обычно нагревают.

Необходимость и желательность использования ХЛШ для сравнительно тонких заготовок обусловлена рядом причин. Во-первых, трудно поддерживать постоянную температуру заготовки; во-вторых, при холодной штамповке получаются детали с хорошим качеством поверхности (при отсутствии окалины) и высокой точностью (при отсутствии тепловых деформаций); в-третьих, можно получать детали сложной пространственной конфигурации, что позволяет создавать облегченные конструкции заданной прочности и жесткости; в-четвертых, применение холодной штамповки позволяет резко сократить или вовсе исключить обработку резанием, что повышает коэффициент использования материала; в-пятых, ХЛШ отличается высокой производительностью.



ХЛШ является одним из наиболее прогрессивных технологических методов производства и имеет ряд преимуществ перед другими видами обработки металлов.

В *техническом плане* холодная штамповка позволяет:

- получать детали сложных форм, изготовление которых другими методами невозможно или затруднительно;
- создавать прочные и жесткие, но легкие по массе детали;
- получать детали с достаточно высокой точностью размеров, преимущественно без последующей механической обработки.

В *экономическом плане* холодная штамповка характеризуется:

- экономным использованием материала;
- высокой производительностью оборудования, с применением механизации и автоматизации производственных процессов;
- серийным и массовым производством с низкой себестоимостью изготавливаемых изделий.

В настоящее время ХЛШ широко применяется в мелкосерийном и единичном (опытном) производстве и характеризуется использованием универсальных и упрощенных штампов, а также новых технологических методов (штамповка взрывом, эластичным инструментом, импульсные методы). Кроме того, с развитием различных отраслей промышленности (радиоэлектроники, приборостроения и пр.) увеличивается доля изделий из листовых неметаллических материалов, успешно изготавливаемых методами листовой штамповки.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Классификация операций

ХЛШ объединяет большое число разнообразных операций, которые можно систематизировать по технологическим признакам.

По характеру деформаций выделяют две основные группы. К первой группе относятся операции, при которых заготовка доводится до разрушения (разделения материала). Такие операции называют разделительными. Ко второй группе относятся операции, сопровождающиеся пластическими деформациями (происходит изменение формы). Их называют формоизменяющими.

Первая группа объединяет операции, которые приводят к местному разединению материала путем среза и отделения одной его части от другой, вторая группа включает операции по изменению формы гнутых и полых листовых деталей.



В операциях листовой штамповки пластические деформации, обеспечивающие заданный характер деформирования, обычно имеют место лишь в части заготовки, которую условно называют очагом пластической деформации. При выполнении разделительных операций стремятся к максимальной локализации очага деформации с целью уменьшить искажения заготовки при деформировании и быстрее исчерпать ресурс пластичности. При осуществлении формообразующих операций наоборот, стремятся к увеличению размеров очага деформации с тем, чтобы уменьшить опасность разрушения.

Классификация основных операций ХЛШ приведена на рис. 1.1.

Штамповка деталей путем выполнения нескольких операций во многих случаях экономически невыгодна. Поэтому обычно применяют методы комбинированной штамповки, которые сочетают две или несколько отдельных операций. Кроме этого, на производстве используются сборочно-штамповочные операции, основанные на применении гибки, формовки или отбортовки. Комбинированная штамповка представляет собой совмещение в одном штампе двух или нескольких операций.

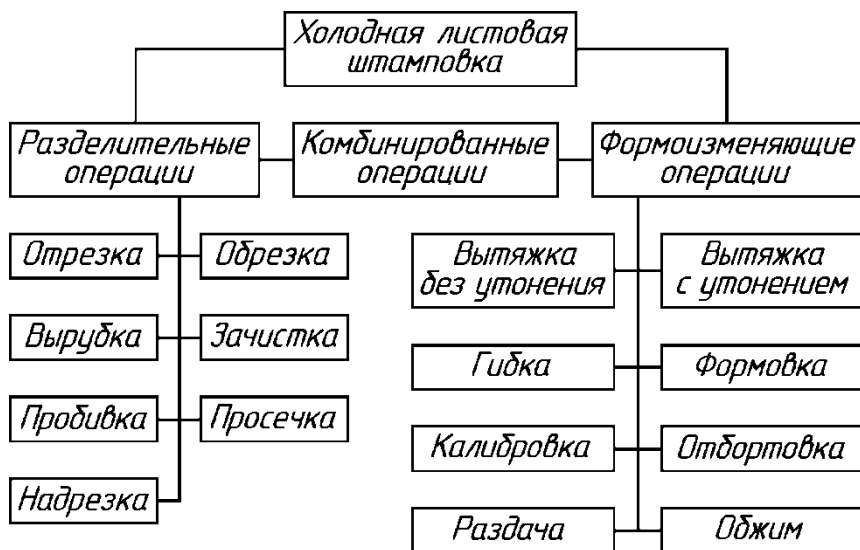


Рис. 1.1. Классификация операций листовой штамповки



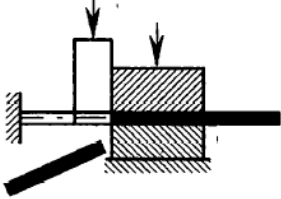
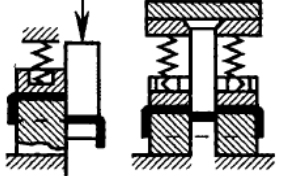
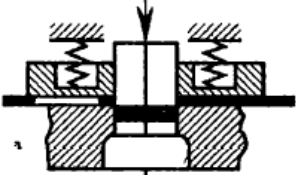
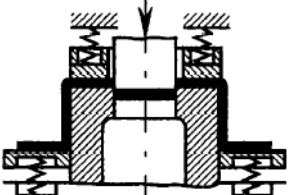
Кроме штамповочных, в холодной штамповке применяются заготовительные, вспомогательные, термические и отделочные операции.

Также необходимо отметить, что в традиционном виде операции листовой штамповки выполняют с помощью двух рабочих инструментов: пуансона и матрицы. Пуансоном называют инструмент, охватываемый заготовкой, а матрицей – инструмент, охватывающий заготовку.

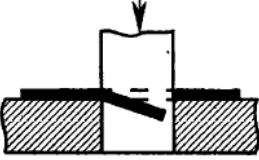
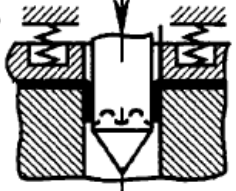
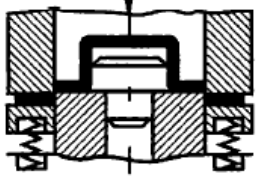
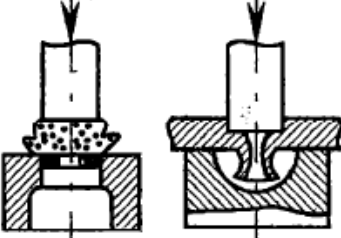
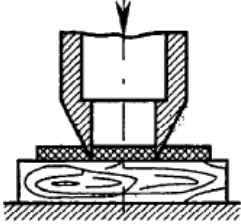
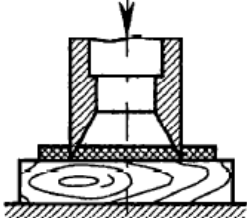
В табл. 1.1 приведены схемы и определения разделительных операций. Следует отметить, что на производстве, в научно-технической и учебной литературе в настоящее время нестрого придерживаются определений, установленных стандартом.

Т а б л и ц а 1.1

Схемы и определения разделительных операций листовой штамповки по ГОСТ 18970-84

Наименование и определение разделительной операции	Схема операции
Отрезка – полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига	
Разрезка – разделение заготовки на части по незамкнутому контуру путем сдвига (с отходом и без отхода)	
Вырубка – полное отделение заготовки или изделия от исходной заготовки по замкнутому контуру путем сдвига (отделенная часть – изделие)	
Пробивка – образование отверстия или паза путем сдвига с удалением отделенной части металла в отход	



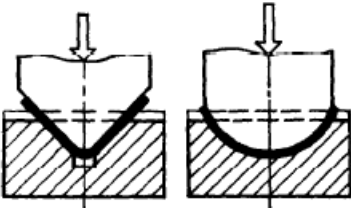
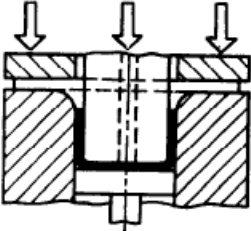
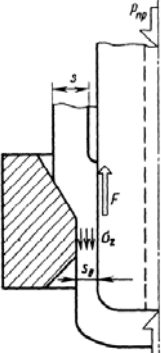
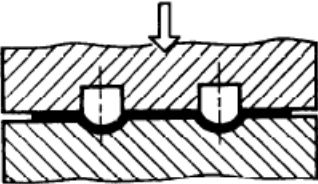
<p>Надрезка – неполное отделение части заготовки путем сдвига</p>	
<p>Проколка – образование в заготовке отверстия без удаления металла в отход</p>	
<p>Обрезка – удаление излишков металла (припусков, облоя) путем сдвига</p>	
<p>Зачистка – удаление технологических припусков с помощью штампа с образованием стружки и для повышения точности размеров и уменьшения шероховатости штампованной заготовки</p>	
<p>Высечка – полное отделение заготовки или изделия по замкнутому контуру путем внедрения инструмента в материал исходной заготовки</p>	
<p>Просечка в штампе – образование отверстия в заготовке путем внедрения в нее инструмента с удалением части материала в отход</p>	



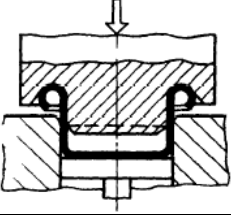
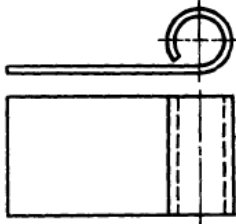
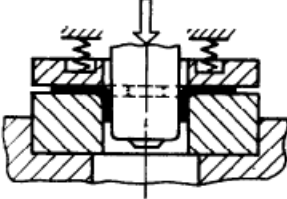
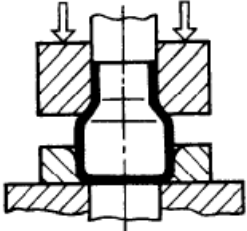
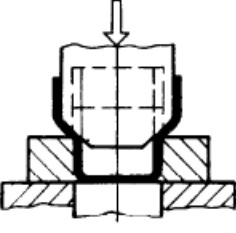
В табл. 1.2 приведены схемы и определения формоизменяющих операций.

Т а б л и ц а 1.2

Схемы и определения формоизменяющих операций листовой штамповки по ГОСТ 18970-84

Наименование и определение формоизменяющей операции	Схема операции
<p>Гибка – образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы</p>	
<p>Вытяжка – образование полого полуфабриката или изделия из плоской или полой заготовки</p>	
<p>Вытяжка с утонением – вытяжка полуфабриката или изделия с обусловленным уменьшением толщины стенки полый заготовки без изменения ее внутреннего диаметра</p>	
<p>Рельефная формовка (формовка) – образование рельефа в заготовке за счет местного растяжения без обусловленного изменения толщины материала</p>	



Наименование и определение формоизменяющей операции	Схема операции
<p>Закатка – образование закругленных бортов на краях полой заготовки</p>	
<p>Завивка – образование закруглений на концах плоской заготовки или заготовки из проволоки</p>	
<p>Отбортовка – образование борта по внутреннему или (и) наружному контуру заготовки</p>	
<p>Обжим в штампе – уменьшение размеров поперечного сечения полой заготовки</p>	
<p>Раздача – увеличение размеров поперечного сечения полой заготовки</p>	



Наименование и определение формоизменяющей операции	Схема операции
<p>Правка давлением – устранение искажений формы заготовки, уменьшение радиусов сопряжений отдельных участков заготовки</p>	
<p>Обтяжка – образование заготовки заданной формы приложением растягивающих усилий к ее краям</p>	

На рис. 1.2 приведены схемы комбинированных операций листовой штамповки: *а* – «вытяжка-обжим»; *б* – «раздача-обжим»; *в* – «вытяжка-обжим-раздача».

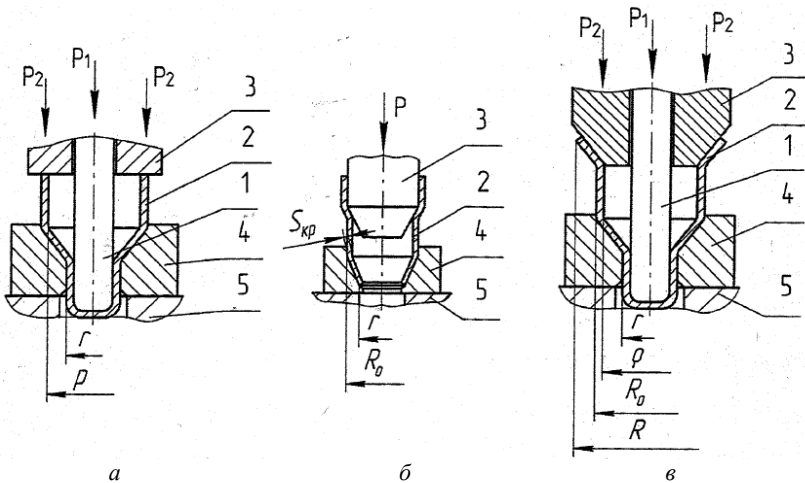


Рис. 1.2. Схемы комбинированных операций листовой штамповки: 1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – пуансон; 4 – матрица; 5 – плита



На рис. 1.3 приведены схемы штамповборочных операций.

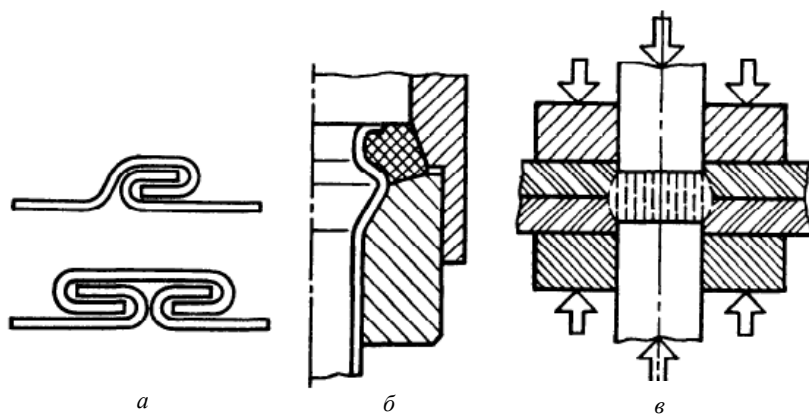


Рис. 1.3. Схемы штамповборочных операций листовой штамповки, выполняемых: *a* – гибкой; *б* – раздачей; *в* – холодной сваркой

1.2. Основные штампуемые материалы

В ХЛШ используются разнообразные как металлические, так и неметаллические материалы.

Материал, предназначенный для листовой штамповки, должен удовлетворять целому ряду требований, которые можно разделить на две основные группы: конструкторские и технологические.

К конструкторским требованиям можно отнести механическую прочность детали, состояние ее поверхности, сопротивление коррозии, электро- и магнитопроводность и другие требования в зависимости от функционального назначения детали.

Технологические требования можно объединить в одно – штампуемость, под которой понимают способность материала обеспечивать требуемое качество изделий при минимальных затратах на его обработку.

Конструкторские и технологические требования удовлетворяются за счет выбора материала, обладающего соответствующим химическим составом, макро- и микроструктурой, механическими свойствами.

Определенные при проектировании изделия и технологии его изготовления конструкторские и технологические требования к листовому материалу с помощью условных обозначений записываются при оформлении конструкторской и технологической документации.



Наиболее распространенными материалами, обрабатываемыми холодной штамповкой, являются черные и цветные металлы:

- 1) сталь различных сортов и марок;
- 2) медь и ее сплавы (латунь, бронза, мельхиор и др.);
- 3) алюминий, магний и их сплавы (дуралюмин, алюминийево-магниевые сплавы и др.);
- 4) цинк и оцинкованная сталь;
- 5) титан и его сплавы.

Менее распространенными штампуемыми металлами и сплавами являются молибден, тантал, бериллий, цирконий и их сплавы, благородные металлы (золото, серебро и др.).

Номенклатура марок металлов и сплавов, выпускаемый сортмент установлены государственными и отраслевыми стандартами.

Самыми распространенными металлами в ХЛШ являются различные сорта листовой и полосовой углеродистой и легированной сталей. Стали (или черные металлы) согласно государственной системе стандартизации классифицируются по пяти признакам: химическому составу, способу выплавки, качеству, структуре и назначению.

По качеству материала листовая и полосовая сталь разделяются на сорта, изготавливаемые из сталей различных марок:

– листовая углеродистая сталь обыкновенного качества по ГОСТ 380-2005 (Ст0 – Ст6);

– листовая углеродистая качественная сталь по ГОСТ 1050-2013 (08, 08кп, 10, 10кп, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50);

– листовая низколегированная сталь по ГОСТ 19282-2014 (16ГС, 12ХГН);

– листовая низколегированная сталь по ГОСТ 19032-73 (11Ю, 18Ю, 18ЮА);

– листовая легированная конструкционная сталь по ГОСТ 1542-71 (60Г, 65Г, 25ХГСА, 10Г2А);

– листовые высоколегированные стали и сплавы (нержавеющие, жаростойкие и жаропрочные) по ГОСТ 5632-2014 (12Х13, 20Х13, 08Х18Н9, 12Х18Н10Т).

По степени способности к вытяжке в холодном состоянии листовой материал из стали подразделяют на следующие группы: Н – нормальной, Г – глубокой, ВГ – весьма глубокой, СВ – сложной и ОСВ – особо сложной вытяжки.

По степени точности прокатки листовая сталь делится на три группы: А – высокая, Б – повышенная, В – обычная точность прокатки.



По степени отделки поверхности сталь подразделяется на четыре группы: I – особо высокая, II – высокая, III – повышенная и IV – нормальная.

По сравнению с черными металлами цветные металлы подвергаются холодной штамповке в значительно меньших объемах, но в таких отраслях, как самолетостроение, электротехника и радиотехника, применение цветных металлов весьма значительно.

Техническая медь марок М1 – М4 хорошо штампуется в холодном состоянии. Из меди различной чистоты изготавливают проволоку, прутки, листы, полосы, ленты, фольгу, трубы, катаные и пресованные профили.

Самыми распространенными медными сплавами являются латуни (ГОСТ 15527-2004). Практическое применение имеют латуни, содержащие до 50 % цинка. Латуни марок Л96, Л85, Л68, Л63 обладают достаточно хорошими механическими свойствами. Латуни, содержащие, кроме меди и цинка, другие металлы, называются специальными. К хорошо деформируемым специальным латуням относятся алюминиевые (ЛА85-0,5, ЛА77-2), свинцовые (ЛС59-1, ЛС63-3) и др.

Медные сплавы, в которых основными легирующими элементами являются олово, алюминий, марганец, кремний, бериллий, железо, называются бронзами (например, оловянистая бронза БрОФ6,5-0,25). В настоящее время в основном штампуют безоловянистые (специальные) бронзы (например, алюминиевая БрА7; алюминий-железо-марганцовистая БрАЖМц10-3-1,5; бериллиевая БрБ2), которые по своим свойствам превосходят оловянистые бронзы.

Большое распространение в различных отраслях промышленности получил технический алюминий марок А0, А5 (ГОСТ 11069-2001), деформируемые алюминиевые сплавы марок АД0 и АД1 (ГОСТ 4784-2019).

Широко применяются в самолето- и моторостроении деформируемые алюминиевые сплавы (ГОСТ 4784-2019). Легирующими компонентами в алюминиевых сплавах являются медь, магний, марганец, а в жаропрочных – никель и железо. Наибольшее распространение получил дуралюмин марок Д1, Д6 и Д16. Алюминиевые сплавы АМц, АМг, АК6 и многие другие применяют для штамповки в виде листа, ленты, фасонных профилей. Сплав АМц применяется для изготовления столовых приборов. Сплав марки АМг используется для деталей, получаемых рельефной формовкой и неглубокой вытяжкой.

Магниевые сплавы (ГОСТ 14957-76), кроме авиационной промышленности, применяют в автомобилестроении (для дисков, тор-



мозных барабанов), в бытовой технике (корпуса приборов, фотоаппаратов). Основное их достоинство – низкая плотность. В качестве легирующих элементов в магниевых сплавах используют алюминий, цинк, марганец. Наиболее широкое применение нашли сплавы МА1, МА2, МА5, МА8, ВМ65-1 и др. Для штамповки вытяжкой их нагревают до 360...380 °С.

Титан и его сплавы (ГОСТ 19807-91) являются наиболее современными конструкционными металлическими материалами в авиационной и космической технике. Наибольшее применение находят сплавы ВТ1-1, ВТ1-2, ВТ14 и др. Титан обладает высокой прочностью и малой плотностью. Штамповку титана и его сплавов также осуществляют с подогревом.

Широкое применение в промышленности в качестве заменителей цветных металлов нашли биметаллы, представляющие собой сочетание стали с томпаком (Л90, Л96). Основной (средний) слой листа – малоуглеродистая сталь ($C < 0,15\%$), а с обеих сторон он покрывается томпаком, составляющим 10...15 % от общей толщины листа. Прокатка биметалла осуществляется в холодном состоянии.

Материал, используемый для изготовления деталей холодной штамповкой, должен соответствовать не только своему назначению и условиям работы, но и технологическим требованиям, которые вытекают из характера и степени производимой деформации. Технологические свойства материала определяются в основном его механическими свойствами, зависящими, в свою очередь, от химического состава, структуры и величины зерна, термообработки, степени наклепа. Для механических и технологических свойств холоднокатаных листовых материалов, применяемых в ХЛШ, наибольшее значение имеют степень наклепа при холодной прокатке и характер термообработки. Для характеристики технологических свойств материала наибольший интерес представляют показатели пластичности, выраженные величиной равномерного относительного сужения ψ_y или равномерного относительного удлинения ϵ_{iy} , а также соотношением между пределом текучести σ_T и пределом прочности σ_B . Для большинства металлов чем меньше это соотношение, тем больше ψ_y . По величине ψ_y можно провести примерное деление металлических материалов на различные группы по пластичности и упрочняемости:

1) малопластичные – очень слабоупрочняющиеся; $\psi_y = 0,10...0,15$ (среднеуглеродистые стали 35, 45 и 50, сталь 12ХНМ и др.);

2) среднепластичные – слабоупрочняющиеся; $\psi_y = 0,15...0,20$ (стали 20, 25 и 30, хромоникелевые стали, наклепанный алюминий);



3) пластичные – среднеупрочняющиеся; $\psi_y = 0,20 \dots 0,25$ (малоуглеродистые стали 08, 10, 15, латунь, отожженный алюминий);

4) высокопластичные – сильноупрочняющиеся; $\psi_y = 0,25 \dots 0,30$ (сталь 12X18H9T после закалки, отожженная медь, сплавы пермаллой (Fe + Ni) и ковар (основа Fe + 18 % Co + 29 % Ni), титановые сплавы).

Характеристики листового проката регламентируются стандартами на технические условия (ТУ), химический состав и сортамент. Листовой прокат выпускают в виде листов, ленты, рулонов. По отдельным ТУ изготавливают прокат в виде полос. В зависимости от способа производства прокат подразделяется на горячекатаный и холоднокатаный. Холоднокатаный прокат по сравнению с горячекатаным имеет меньшую шероховатость поверхности, разнотолщинность и более высокие технологические свойства. Он широко применяется для изготовления холодноштампованных изделий. Из горячекатаного проката методами листовой штамповки изготавливают преимущественно неглубокие и плоские детали. В машиностроении основную массу холодноштампованных деталей изготавливают из тонколистовых углеродистых качественных и низколегированных листовых сталей.

Вид исходной заготовки определяется конкретными условиями производства, в частности в значительной мере серийностью. В мелкосерийном производстве штамповку в основном ведут с ручной подачей, поэтому исходной заготовкой является лист, который нарезают на штучные заготовки или полосы требуемых размеров. В крупносерийном и массовом производстве применяют автоматизированную штамповку из листа без резки его на полосы, ленты или рулоны. На предприятиях количество типоразмеров исходных заготовок ограничивается стандартами предприятия.

Листовой холоднокатаный прокат по ГОСТ 19904-90 подразделяется:

- по точности изготовления по толщине (Т), ширине (Ш) и длине (Д): высокой точности (ВТ, ВШ, ВД), повышенной (АТ, АШ, АД) и нормальной (БТ, БШ, БД);

- по плоскостности: особо высокая (ПО), высокая (ПВ), улучшенная (ПУ), нормальная (ПН);

- по характеру кромки: обрезная (О), необрезная (НО).

Лента холоднокатаная из низкоуглеродистой стали по ГОСТ 503-81 подразделяется:

- по состоянию материала: особомягкая (ОМ), мягкая (М), полунагартованная (ПН), нагартованная (Н), высоконагартованная (ВН);



- по точности изготовления по толщине: нормальной точности, повышенной точности (Т), высокой точности (В);
- по точности изготовления по ширине: нормальной точности, повышенной точности (Ш);
- по виду и качеству поверхности: первой группы (1), второй группы (2), третьей группы (3), четвертой группы (4);
- по виду кромок: с обрезанными кромками, с необрезанными кромками (НО);
- по микроструктуре: без контроля, с контролем (К);
- по серповидности: без контроля, с контролем (класс А и класс Б);
- по качеству изготовления: обыкновенного качества, повышенного качества (П).

Аналогичные условия изготовления устанавливаются государственными стандартами или техническими условиями и на остальные листовые материалы, в том числе из цветных металлов и сплавов.

Требования к размерам листа (ленты, полосы), к точности изготовления, по механическим свойствам и др. указывают в обозначении исходной заготовки. Требования к структуре обозначения и примеры обозначений приведены в соответствующих ГОСТах.

Например, лента из марки стали 08кп особо мягкая, нормальной точности изготовления по толщине и ширине, 2-й группы поверхности с обрезанными кромками, без контроля микроструктуры и серповидности, толщиной 1,2 мм, шириной 100 мм обыкновенного качества будет обозначена следующим образом:

Лента 08кп – ОМ – 2 – 1,2×100 ГОСТ 503-81.

Прокат холоднокатанный листовой, повышенной точности: по толщине (АТ), по ширине (АШ), по длине (АД), нормальной плоскостности (ПН), с обрезной кромкой (О), размером 2×1000×2000 мм по ГОСТ 19904-90, из стали марки 12Х18Н10Т, нагартованный:

Лист $\frac{АТ - АШ - АД - ПН - 0 - 2 \times 1000 \times 2000 \text{ ГОСТ } 19904 - 90}{12Х18Н10Т - Н1 \text{ ГОСТ } 5582 - 75}$.

Лист из алюминия марки АД1 отожженный, толщиной 5 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм, нормальной точности изготовления, обычной отделки поверхности будет обозначен следующим образом:

Лист АД1.М 5×1000×2000 ГОСТ 21631-76.



В качестве исходных заготовок в листоштамповочном производстве широко применяют листы и ленты, изготавливаемые по следующим стандартам:

- ГОСТ 19903-74. Прокат листовой горячекатаный;
- ГОСТ 19904-74. Прокат листовой холоднокатаный;
- ГОСТ 503-81. Лента холоднокатаная из низкоуглеродистой стали;
- ГОСТ 6009-74. Лента стальная горячекатаная;
- ГОСТ 13726-97. Ленты из алюминия и алюминиевых сплавов.

Технические условия;

- ГОСТ 21631-2019. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов.

Технические условия;

ГОСТ 5582-75. Прокат тонколистовой коррозионностойкой, жаростойкой и жаропрочной;

ГОСТ 1173-2006. Фольга, ленты, листы и плиты медные. Технические условия;

- ГОСТ 931-90. Листы и полосы латунные. Технические условия.

ГОСТ 2208-91. Ленты латунные общего назначения. Технические условия.

Неметаллические материалы, обрабатываемые методами листовой штамповки, делят на две группы: органические полимеры (каучук, целлюлоза, смолы, кожа и др.), материалы неорганического происхождения (сланец, асбест и др.).

Для штамповки материалы поступают трех видов:

- 1) блочные пластмассы, резина, эбонит;
- 2) слоистые материалы с органическими (гетинакс, текстолит) и неорганическими наполнителями (стеклотекстолит, миканит);
- 3) волокнистые материалы (войлок, фетр, кожа, фибра, прессшпан, ткани и др.).

Органические полимеры состоят из больших молекул, образующих линейные цепи, двумерные или трехмерные сетки. Расположение элементарных молекул в цепи или сетке определяет свойства этих материалов. У материалов с линейными цепями и двумерными сетками наблюдается резко выраженная анизотропия механических свойств, у материалов с трехмерной сеткой – более равномерные свойства в различных направлениях.

Слоистые и волокнистые материалы, кроме слюды, являются композиционными материалами, полученными из листового или волокнистого наполнителя и связующего вещества: пластмассы + смолы, лаки, клеи и т.д. К листовым пластмассам, имеющим слоистую структуру, относятся гетинакс, текстолит и стеклотекстолит, к пластмассам гомогенной структуры – органическое стекло и др.



Гетинакс – слоистый прессованный материал, получаемый на основе бумаги, пропитанной искусственными смолами. Поддается только штамповке вырубкой-пробивкой, причем для листов толщиной свыше 1 мм – с применением нагрева.

Текстолит получается на основе ткани, обработанной искусственными смолами. Он штампуются лучше гетинакса и при нагреве может быть подвергнут гибке и вытяжке.

Стеклотекстолит содержит в качестве наполнителя стеклянную ткань или представляет собой комбинацию стеклоткани с хлопчатобумажной тканью, пропитанной искусственной смолой.

Органическое стекло в виде листов получают литьем в металлических формах или в формах из силикатного стекла. При нагреве поддается всем видам операций листовой штамповки.

Эбонит – вулканизованная резина с большим содержанием серы. При нагреве поддается штамповке.

К листовым материалам, получаемым на основе бумаги, относятся картон и фибра. Картон изготавливается из бумажной массы путем многократного наплаивания листов с последующим прессованием их и сушкой. Фибру получают обработкой непроклеенной бумаги раствором хлористого цинка.

пластинок особыми лаками и подвергнутые горячему прессованию. Слюда – слоистый материал природного происхождения, легко разделяемый на тончайшие пластинки (до 5 мкм) с ровной поверхностью. Слюда может штамповаться только вырубкой-пробивкой.

Миканиты – непрозрачные твердые материалы, получающиеся при склеивании тонких слюдяных

1.3. Методы испытаний и определение механических и технологических свойств листовых материалов

Установить соответствие свойств металла предъявляемым к нему конструкторским и технологическим требованиям можно с помощью целого ряда методов, которые можно подразделить на три основные группы: физико-химические исследования, механические и технологические испытания (пробы).

Физико-химические исследования. Физико-химические исследования включают в себя химический анализ и металлографию. С помощью химического анализа устанавливается соответствие химического состава металла требованиям государственных и отраслевых стандартов.



Наиболее существенное влияние на штампуемость стали оказывает углерод. С повышением его содержания увеличивается прочность стали при одновременном снижении пластичности. По этой причине, например, для формоизменяющих операций, прежде всего глубокой вытяжки, для выполнения которой требуется высокая пластичность металла, наиболее пригодны малоуглеродистые стали с содержанием углерода не более 0,08% (стали 08кп, 08пс, 08Ю).

Штампуемость металла зависит от содержания в нем и других элементов: фосфора, серы, марганца, кремния и др.

Фосфор и сера являются вредными примесями. При повышенном их содержании сталь приобретает повышенную упрочняемость в процессе деформирования и низкую пластичность, поэтому содержание этих элементов в сталях для холодной штамповки ограничивается 0,01...0,025%.

Марганец и кремний также оказывают упрочняющее действие на сталь, и в сталях, предназначенных для формоизменяющих операций, их содержание должно быть небольшим. Однако необходимо иметь в виду, что при значительном содержании марганец и кремний придают сталям специальные физические и эксплуатационные свойства. Например, стали с содержанием 0,5...0,85% углерода и 0,5...1% марганца используются для изготовления пружин. Стали с содержанием 0,5...1,5% кремния имеют повышенную электро- и магнитопроводность и широко используются в электротехнике.

Существенное влияние на штампуемость стали, иногда даже большее, чем количественное содержание, оказывает структурное состояние углерода, размер зерен феррита, наличие и размер включений цементита.

Опыт работы автомобильных заводов показал, что оптимальная для обработки давлением величина зерен феррита должна находиться в пределах 0,024...0,032 мм при толщине листа до 2 мм и 0,032...0,052 мм при толщине листа свыше 2 мм.

С уменьшением величины зерен по сравнению с оптимальными размерами возрастает сопротивление стали деформированию, повышается износ рабочих элементов штампов, увеличивается пружинение металла, существенно влияющее на точность размеров штампованных изделий.

При чрезмерно крупном зерне поверхность детали после штамповки становится шероховатой (появляется так называемая апельсиновая корка). Крупное зерно может быть одной из причин разрушения заготовки при вытяжке.



Крайне отрицательное влияние на штампуемость сталей оказывает наличие включений структурно-свободного цементита. Объясняется это тем, что частицы чрезвычайно твердого и хрупкого цементита, разламываясь на более мелкие, образуют трещины, распространяющиеся даже в феррите.

Полосчатость микроструктуры, характеризующаяся вытянутостью зерен в направлении наибольшей деформации при прокатке, существенно влияет на штампуемость металла и приводит к его анизотропии.

Механические испытания. Механические испытания включают в себя испытания на растяжение плоских образцов для определения механических свойств листового проката и определения коэффициента анизотропии (ГОСТ 11701-84).

Технологические пробы. Технологические пробы включают в себя:

– испытания на срез – для получения характеристики «напряжение среза», используемой при расчете силы на разделительных операциях;

– испытание на изгиб (ГОСТ 14019-68) – для определения минимального радиуса изгиба;

– испытания на перегиб (рис. 1.4);

– испытания на формовку сферической лунки (проба Эриксона, рис. 1.5). Определяют категорию металла для вытяжки, изотропность механических свойств и микроструктуру (размер зерна);

– испытания на вытяжку детали цилиндрической формы (проба Энгельгардта, рис. 1.6). Определяют минимальный (предельный) коэффициент вытяжки;

– технологические пробы непосредственно в производственном штампе.

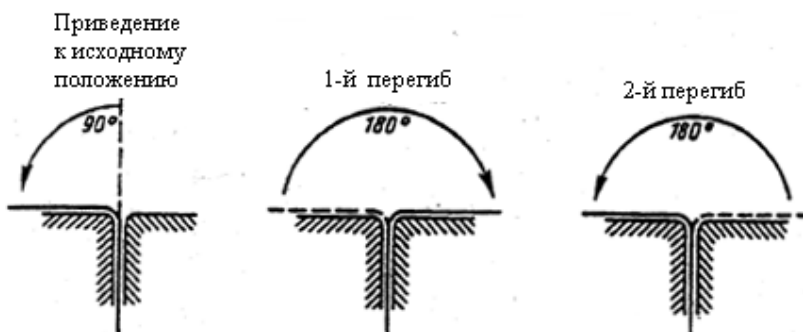


Рис. 1.4. Схема испытания на перегиб



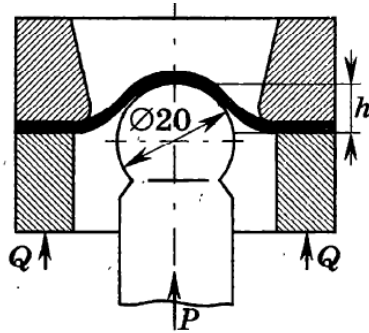


Рис. 1.5. Схема испытания на вытяжку сферической лунки

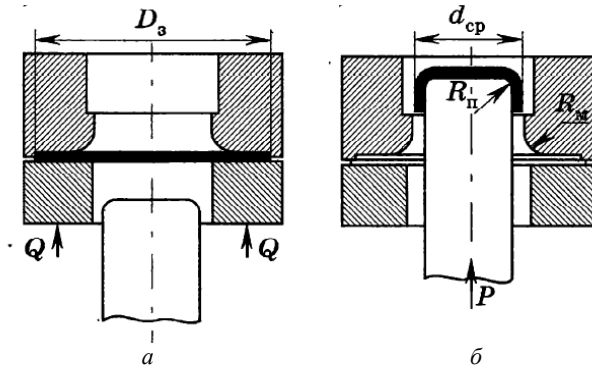


Рис. 1.6. Испытание на вытяжку цилиндрического колпачка:
а – начало испытания; б – окончание испытания

В некоторых случаях для определения вероятности разрушения при штамповке деталей сложной формы на поверхность заготовки наносят круглые риски диаметром 5...30 мм. В результате пластической деформации круглая ячейка превращается в эллипсоид (рис. 1.7). По отношению полуосей эллипсоида и радиуса начальной ячейки

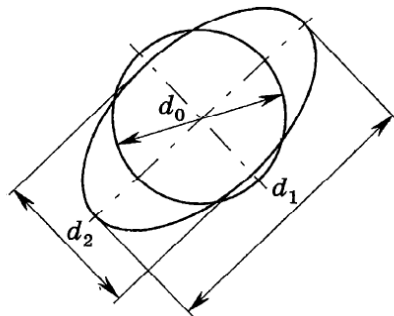


Рис. 1.7. Схема ячейки координатной сетки



ки можно рассчитать главные логарифмические деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и интенсивность (степень) деформации ε_i . Имея диаграмму упрочнения для материала заготовки, можно определить интенсивность пружений σ_i и главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Далее по диаграммам предельной пластичности для материала заготовки, получаемым по результатам экспериментальных исследований, определяют предельную степень деформации $\varepsilon_{пр}$. Диаграммы предельной пластичности получают в координатах $\varepsilon_{пр} - \Pi$ или $\varepsilon_{пр} - \varepsilon_i/\varepsilon_{пр}$ (рис. 1.8 и 1.9 соответственно). Π – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния, предложенный Г.А. Смирновым-Аляевым и вычисляемый по формуле

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$$

Сведения о методах построения диаграмм предельной пластичности студенты получают при изучении дисциплины «Экспериментальные методы в обработке металлов давлением» и «Теория обработки металлов давлением».

Чем ближе отношение $\varepsilon_i/\varepsilon_{пр}$ к единице, тем больше вероятность разрушения заготовки (в исследуемой части заготовки).

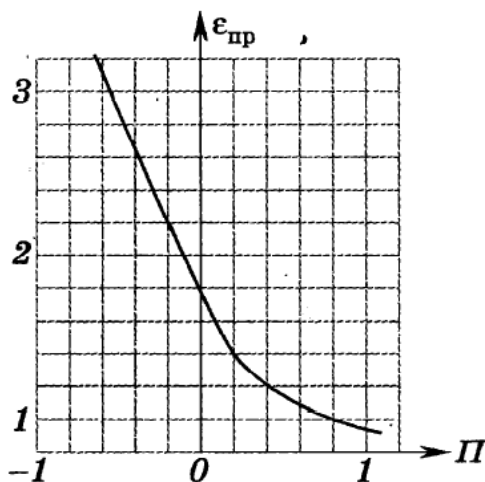


Рис. 1.8. Диаграмма предельных деформаций в зависимости от коэффициента жесткости схемы напряженного состояния



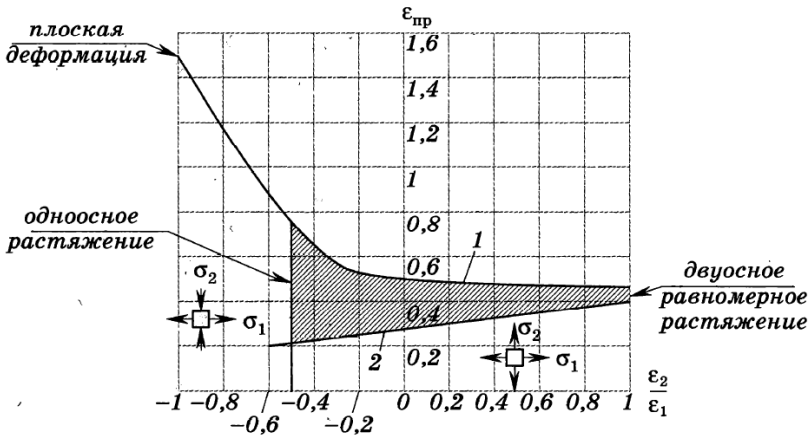


Рис. 1.9. Диаграмма предельных деформаций

2. РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

2.1. Механизм разделения материала

Разделение материала обычно осуществляют воздействием двух режущих кромок на противоположные поверхности заготовки (рис. 2.1).

Благодаря наличию зазора z между режущими кромками силы P , приложенные к противоположным поверхностям заготовки, образуют момент M , стремящийся повернуть заготовку. Поворот заготовки приводит к тому, что контактные напряжения становятся максимальными у режущих кромок и резко уменьшаются до нуля на границе контактного участка.

Концентрация напряжений приводит к тому, что у режущих кромок возникает очаг пластических деформаций, размеры которого увеличиваются по мере роста деформирующей силы. В определенный

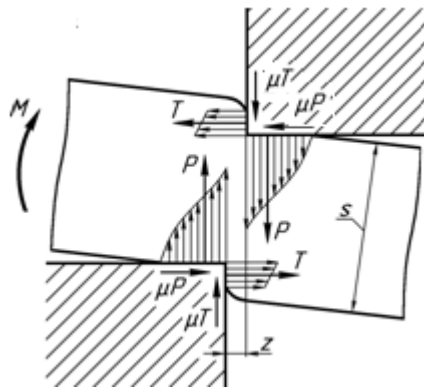


Рис. 2.1. Силы, действующие при разделении материала



момент очага деформации, распространяющиеся от противоположных режущих кромок, сливаются и образуют единый очаг.

Дальнейшее сближение режущих кромок приводит к тому, что начинается сдвиг одной части заготовки относительно другой в направлении относительного движения режущих кромок. На стадии сдвига слои металла, параллельные плоскостям заготовки, изгибаются и удлиняются.

На ранней стадии сдвига режущие кромки внедряются в заготовку и образуются участки контакта заготовки с боковыми поверхностями режущего инструмента. Упираясь в боковые поверхности инструмента, заготовка приводит к образованию горизонтальных сил T и сил трения μT , которые вызывают сжимающие контактные напряжения, сглаживающие поверхность при перемещении режущего инструмента относительно заготовки.

Так как очаг деформации зарождается у режущих кромок, то вблизи них будет максимальной накопленная в процессе сдвига интенсивность деформаций. Для каждого металла и заданной схемы напряженного состояния существует предельное значение интенсивности деформаций, которую может выдержать металл без разрушения. Поэтому по мере сближения режущих кромок наступает момент, когда пластичность металла будет исчерпана и начнется разрушение заготовки.

Зарождение трещины происходит у режущих кромок (рис. 2.2, *а*). Трещины быстро развиваются в толщину заготовки и при их встрече процесс разделения заготовки заканчивается. Он может завершаться при внедрении режущих кромок на определенную долю толщины. В этом случае поверхность среза будет иметь два существенно различающихся по гладкости участка: блестящий поясок и шероховатый участок – поверхность скола (рис. 2.2, *б*).

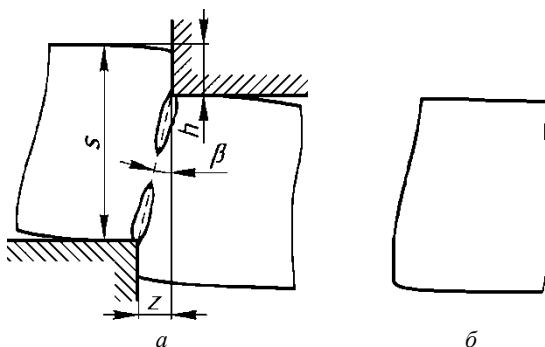


Рис. 2.2. Образование трещин скола (*а*) и форма боковой поверхности отделенной заготовки (*б*)



Высота блестящего пояска h возрастает с увеличением пластических свойств металла заготовки и для большинства штампуемых металлов колеблется от $0,1s$ до $0,3s$ (s – толщина заготовки). Для весьма пластичных материалов высота h достигает $(0,5 \dots 0,8)s$.

Трещины, образующиеся от режущих кромок, обычно слегка повернуты от вертикали к свободным поверхностям заготовки под углом $\beta = 4 \dots 6^\circ$, причем этот угол увеличивается с ростом пластичности металла. Образованию трещин и отклонению их от вертикали способствует расклинивающее действие сил P и T .

Условие совпадения трещин определяется из геометрических соображений (см. рис. 2.2, *a*) из соотношения

$$z = (s - h) \tan \beta . \quad (2.1)$$

Совпадение трещин обеспечивается определенным зазором, зависящим от свойств металла. А так как высота блестящего пояска h с изменением пластичности металла меняется в большем диапазоне, чем угол β , то зазор z должен уменьшаться с увеличением пластичности металла.

Если величина зазора между режущими кромками меньше значения, определяемого по формуле (2.1), то трещины параллельны и не совпадают (рис. 2.3, *a*). При дальнейшем движении отделенного материала по матрице перемычка между трещинами срезается и образуется поясок вторичного среза, который не только ухудшает качество поверхности раздела, но и является концентратором напряжений (рис. 2.3, *б*).

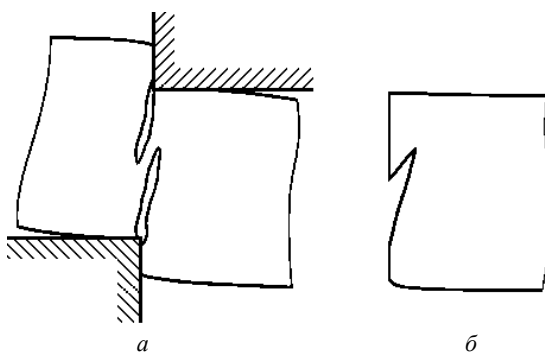


Рис. 2.3. Расхождение трещин скола при малом зазоре (*a*) и образование пояска вторичного среза (*б*)



Увеличение зазора относительно значения, определяемого по формуле (2.1), не приводит к появлению пояска вторичного среза. При этом за счет увеличения поворота заготовки или ее прогиба угол β , под которым идут образующиеся трещины, также увеличивается.

При наличии притупления режущих кромок расклинивающее действие сил P и T приводит к тому, что зарождение трещин происходит несколько выше торца режущего инструмента (рис. 2.4, *а*) и на отделенных частях заготовки образуются острые торцевые заусенцы (рис. 2.4, *б*). Появление заусенцев нежелательно по соображениям техники безопасности. Кроме того, торцевые заусенцы могут сказываться на точности подачи заготовки при механизированной подаче. Высота торцевых заусенцев возрастает по мере притупления режущих кромок, а также при увеличении зазора z .

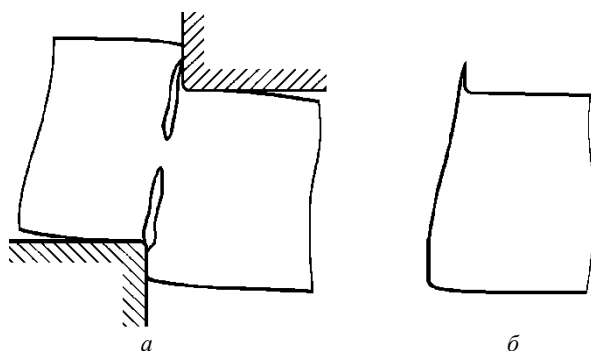


Рис. 2.4. Разделение материала с притупленной режущей кромкой (*а*) и образование торцевого заусенца (*б*)

Пластические деформации, возникшие в заготовке до появления трещин, в условиях холодной штамповки вызывают упрочнение материала вблизи поверхности раздела. Ширина зоны упрочнения может колебаться в пределах $\Delta = (0,6 \dots 0,8)s$.

Характер изменения силы резания и величина максимальной силы резки зависят от типа разделительной операции. Однако во всех случаях при расчете силы резания используют условную технологическую величину – сопротивление срезу $\sigma_{ср}$. Эта величина объединяет все виды сопротивления вырезаемого металла и автоматически учитывает упрочнение металла к моменту скола. Как показывают исследования, сопротивление срезу зависит не только от механических свойств металла и степени предварительного наклепа, но и от относи-



тельной толщины вырубки, зазора z и скорости резания. Для большинства случаев изменение сопротивления срезу невелико и при отсутствии справочных данных можно пользоваться соотношением

$$\sigma_{\text{ср}} = k_{\sigma} \sigma_{\text{в}}, \quad (2.2)$$

где коэффициент k_{σ} устанавливается в зависимости от марки материала по табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Значения k_{σ} для штампуемых металлических материалов

Материал	k_{σ}
Сталь малоуглеродистая	0,75...0,90
Сталь нержавеющая марок 12Х13 и 12Х18Н9	0,68...0,72
Сталь шарикоподшипниковая ШХ15	0,72...0,78
Латунь	0,65...0,75
Алюминий мягкий	0,75...0,90
Алюминий твердый	0,55...0,70
Дуралюмин мягкий	0,65...0,75
Дуралюмин твердый	0,60...0,65
Титан марок ВТ1-1 и ВТ1-2	0,65...0,70

2.2. Отрезка

Отрезкой называется разделительная операция, при которой осуществляется полное отделение части листовой заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига.

Листовые материалы для холодной штамповки в большинстве случаев предварительно разрезают на полосы или заготовки необходимых размеров. Отрезка в большинстве случаев является заготовительной операцией и выполняется на ножницах или совмещается с другими операциями в штампах. Для отрезки используют ножницы с поступательным или вращающимся движением ножей.

Отрезка на ножницах с поступательным движением ножей.

В этом случае можно использовать два типа ножниц: с параллельными и наклонными (гильотинные, рычажные) режущими кромками.



При параллельных режущих кромках (угол створа $\alpha = 0^\circ$) разделение происходит одновременно по всей длине отрезаемой заготовки (рис. 2.5). Задний угол β заточки режущей кромки движущегося ножа находится в пределах $2...3^\circ$.

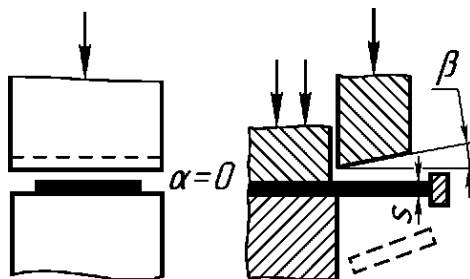


Рис. 2.5. Ножницы с параллельными режущими кромками

В этом случае сила реза возрастает по мере внедрения режущих кромок и рывком падает до нуля при перемещениях $x = h$. Характер изменения силы отрезки представлен на рис. 2.6.

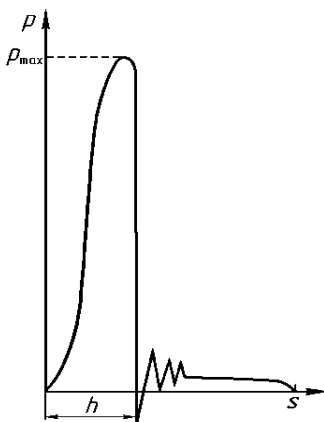


Рис. 2.6. График изменения силы отрезки при параллельных режущих кромках

Расчетное значение силы отрезки P определяется по формуле

$$P = Ls\sigma_{\text{ср}}, \quad (2.3)$$

где L – длина реза. Работа резания A при отрезке параллельными кромками:

$$A = xPs = P_{\text{ср}}s, \quad (2.4)$$

где x – коэффициент, показывающий, какую долю составляет усредненная сила резания $P_{\text{ср}}$ от максимальной P .

Величина коэффициента x зависит от рода и толщины мате-

риала табл. 2.2.



Значения коэффициента x

Материал	x при толщине материала s , мм			
	До 1	Свыше 1 до 2	Свыше 2 до 4	Свыше 4
Сталь мягкая ($\sigma_{\text{ср}} = 250 \dots 350$ МПа)	0,70...0,65	0,65...0,60	0,60...0,50	0,45...0,35
Сталь средней твердости ($\sigma_{\text{ср}} = 350 \dots 500$ МПа)	0,60...0,55	0,55...0,50	0,50...0,42	0,40...0,30
Твердая сталь ($\sigma_{\text{ср}} = 500 \dots 700$ МПа)	0,45...0,40	0,40...0,35	0,35...0,30	0,30...0,15
Алюминий, медь (отожженные)	0,75...0,70	0,70...0,65	0,65...0,55	0,50...0,40

Вибрация, возникающая при резком снижении усилия, сказывается на работоспособности ножниц и приводит к быстрой разладке инструмента (увеличение зазора между режущими кромками и т.п.).

Большую плавность изменения силы обеспечивает наклонное расположение режущих кромок ножей в гильотинных (рис. 2.7) или рычажных ножницах. В этом случае процесс резания рассредоточивается по ходу ножа, а в любой момент резания площадь среза представляет собой треугольник с углом при вершине, равным углу створа между режущими кромками.

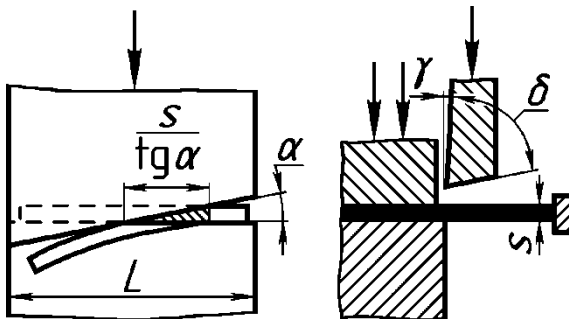


Рис. 2.7. Ножницы с наклонными режущими кромками (гильотинные)

Такие схемы используются для отрезки заготовок толщиной до 40 мм. Угол створа для гильотинных ножниц $\alpha = 2^\circ \dots 6^\circ$, для рычажных $\alpha = 7^\circ \dots 12^\circ$. Угол резания δ изменяется в пределах $75^\circ \dots 85^\circ$, а передний угол $\gamma = 2^\circ \dots 3^\circ$ (большие значения для более мягких мате-



риалов). Для упрощения заточки ножей допускается $\delta = 90^\circ$ и $\gamma = 0^\circ$. Зазор z между ножами выбирается в пределах от 0,02 до 0,2 мм.

Характер изменения силы отрезки в процессе разделения на гильотинных ножницах показан на рис. 2.8. Сила отрезки на гильотинных или рычажных ножницах значительно меньше (в 50...60 раз), чем при отрезке на ножницах с параллельными режущими кромками.

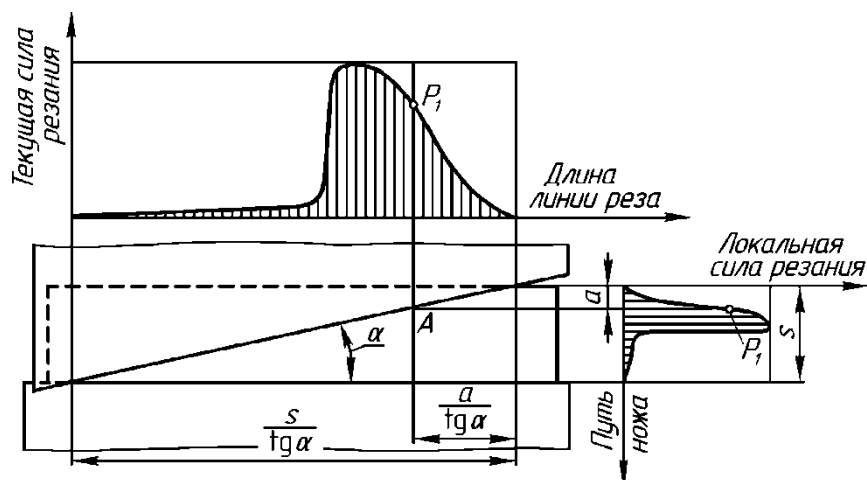


Рис. 2.8. Графики изменения силы резания на гильотинных ножницах

Если принять, что сила отрезки пропорциональна одновременно срезаемой площади:

$$F_{\text{сп}} = \frac{s^2}{2 \tan \alpha},$$

то приближенная формула для определения силы в случае наклонных режущих кромок примет вид

$$P = \sigma_{\text{сп}} \frac{s^2}{2 \tan \alpha} \quad \text{при} \quad \frac{s}{\tan \alpha} < L. \quad (2.5)$$

В технологических расчетах эту формулу рекомендуется использовать в случае $\alpha = 2^\circ \dots 5^\circ$. Из нее следует, что сила отрезки наклонными ножами уменьшается с увеличением угла створа α .



С большей точностью силу отрезки можно рассчитать по формуле

$$P = \sigma_{\text{ср}} \frac{\text{sh}\lambda}{\tan \alpha} (1 + 0,05\alpha) \text{ при } \frac{s}{\tan \alpha} < L, \quad (2.6)$$

где λ – коэффициент, аналогичный коэффициенту x (но не равный ему); K – коэффициент, учитывающий неоднородность свойств, неравномерность толщины заготовки и притупление кромок ($K = 1,0 \dots 1,3$); α – в градусах.

Работа отрезки на гильотинных или рычажных ножницах:

$$A = kPL \tan \alpha, \quad (2.7)$$

где k – коэффициент, учитывающий вход и выход ножей, а также работу, гибки отрезаемой полосы (на практике $k = 1,0 \dots 1,15$).

Возможность увеличения угла створа режущих кромок ограничивается, во-первых, необходимостью надежного удержания заготовки в процессе резания, а во-вторых, требованиями к допустимому искажению отрезаемой полосы. При отрезке полосы наклонным ножом возникает горизонтальная составляющая силы резания, которая стремится вытолкнуть заготовку из-под режущих кромок. Несмотря на наличие прижима заготовки в ножницах, стараются выбрать угол створа таким, чтобы даже без действия прижима заготовка не перемещалась. Ее неподвижность будет обеспечена, если угол створа будет меньше угла трения или $\tan \alpha < \mu$, где μ – коэффициент трения. Поскольку листы на отрезку обычно поступают со смазочным материалом, предохраняющим от коррозии, то $\mu < 0,1$ и, следовательно, $\alpha < 6^\circ$.

С увеличением угла створа возрастает искажение отрезаемой полосы, которая изгибается с поворотом (рис. 2.9). Если необходимо, чтобы полоса не испытывала пластических деформаций (допустив, что $\varepsilon < 0,2\%$), то допустимый угол створа:

$$\alpha < \arccos \left(1 - \frac{0,004h}{s} \right). \quad (2.8)$$

Из формулы (2.8) видно, что при $h = 0,25s$ угол α должен быть менее 3° , для того чтобы при отрезке не возникал остаточный изгиб полосы.

Действие боковых сил T (см. рис. 2.1) при отрезке может приводить к упругому прогибу ножей и, следовательно, к росту величины зазора между режущими кромками. Поэтому зазоры при отрезке рекомендуют принимать несколько меньшими, чем нормальные, которые определяются по формуле (2.1).



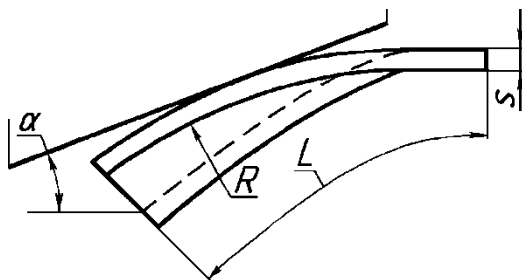


Рис. 2.9. Изгиб полосы при отрезке на гильотинных ножницах

Для уменьшения сил резания и улучшения качества поверхности среза ножам иногда придают особую форму, схематично показанную на рис. 2.10. Задний угол β уменьшает силу резания за счет снижения сил трения при резании, а передний угол γ уменьшает площадь контакта заготовки с торцами ножей, что уменьшает горизонтальные силы T и изменение зазора в процессе резания. Такая сложная форма ножей несколько затрудняет их переточку, но улучшает качество среза и уменьшает высоту торцовых заусенцев.

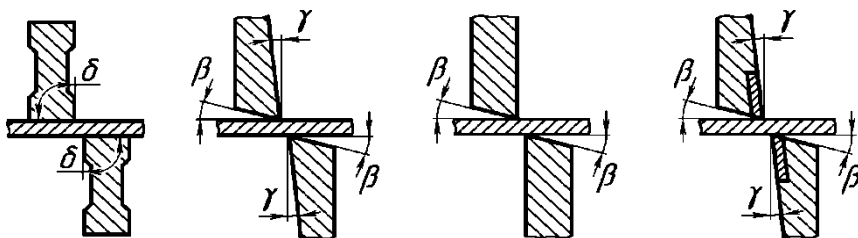


Рис. 2.10. Варианты исполнений ножей

Отрезка на ножницах с вращательным движением режущих кромок. В этом случае ножи представляют собой диски, установленные на параллельных осях и получающие вращательное движение (рис. 2.11). По такой схеме осуществляют отрезку заготовок толщиной до 30 мм. Существенным достоинством дисковых ножниц является то, что длина отрезаемой полосы не ограничена, в то время как на ножницах с поступательным движением ножей длина полосы не может быть больше длины ножей.



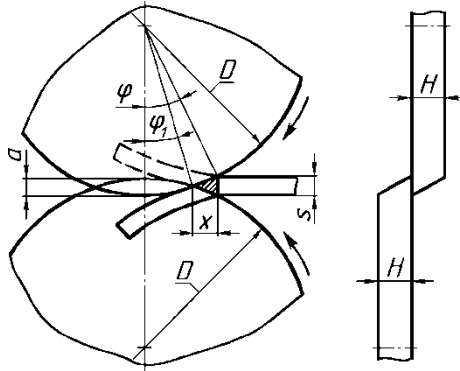


Рис. 2.11. Схема отрезки на дисковых ножницах

Вращение дисков обеспечивает не только резку материала, но и его подачу. Чтобы облегчить подачу заготовки при отрезке на дисковых ножницах, стремятся установить такой угол захвата φ , при котором заготовку втягивало бы действием внешних сил трения между ножами. Условие захвата обеспечивается при $\tan \varphi < \mu$. Но поскольку угол захвата зависит от отношения диаметра диска к толщине заготовки, то условие захвата может быть представлено в виде

$$\frac{2R}{s} > \frac{1}{2\mu^2}, \quad (2.9)$$

где R – радиус дискового ножа.

Рекомендуемые толщины и диаметры дисковых ножей:
 $H = 20 \dots 25$ мм, $D = (35 \dots 50)s$ для $s < 3$ мм; $H = 50 \dots 90$ мм,
 $H = 50 \dots 90$ мм, $D = (25 \dots 30)s$ для $s > 10$ мм.

Максимальное значение угла захвата не должно превышать 14° . Для улучшения качества поверхности среза у дисковых ножей иногда предусматривают передний угол резания $\gamma = 1 \dots 2^\circ$.

Прямолинейность линии реза при отрезке обеспечивается наличием направляющей, по которой подается заготовка, а также площадью контакта заготовки с боковыми плоскостями ножей. Для повышения точности направления и обеспечения прямолинейности линии реза стремятся увеличить площадь соприкосновения разделяемых частей заготовки с боковой плоскостью ножей. Для этого создают перекрытие режущих кромок величиной a , при этом одна режущая кромка заходит за другую. Величину перекрытия принимают равной $a = (0,2 \dots 0,5)s$, чтобы не слишком ухудшать условия захвата, так как с увеличением a угол φ возрастает.



Вертикальная составляющая силы резания аналогично предыдущему случаю может быть приближенно определена по площади среза:

$$P = \frac{s^2 \sigma_{\text{ср}} \sqrt{RK}}{2(\sqrt{s+a} + \sqrt{a})}, \quad (2.10)$$

где R – радиус дискового ножа. Из формулы (2.10) видно, что при одной и той же заготовке сила отрезки повышается с увеличением радиуса ножа R и с уменьшением перекрытия a , так как при этом увеличивается площадь среза.

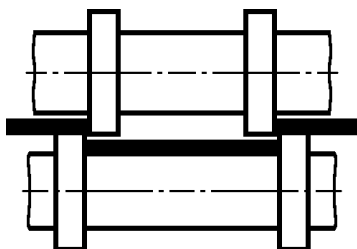


Рис. 2.12. Многодисковые ножницы

Для одновременной отрезки нескольких полос, а также для отрезки полос и ленты на заданную ширину используют многодисковые ножницы (рис. 2.12). Они более производительны и на них можно получать полосы более точных размеров (7-й класс точности по ГОСТ 8.401-80).

2.3. Вырезка

Вырезкой называют операцию отделения части заготовки по замкнутому контуру на ножницах. Для вырезки используют дисковые ножницы с наклонными ножами и ножницы с возвратно-поступательным движением ножей (вибрационные).

При вырезке необходимо максимально облегчить поворот заготовки относительно ножей, чтобы обеспечить отделение заготовки по криволинейному контуру. Облегчение поворота заготовки на дисковых ножницах достигается за счет того, что боковая поверхность ножей имеет коническую форму, а режущие кромки не доходят друг до друга (рис. 2.13).

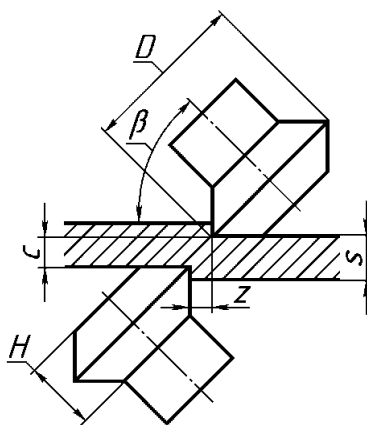


Рис. 2.13. Дисковые ножницы с наклонными ножами



По такой схеме осуществляется вырезка круглых, дисковых кольцевых и криволинейных заготовок с малым радиусом и толщиной до 20 мм. Криволинейная поверхность задней режущей грани ножей обеспечивает свободный поворот материала, благодаря чему возможна вырезка по контуру с различным знаком кривизны. Точность получения размеров при вырезке на дисковых ножницах может достигать 8-го класса.

Минимальный радиус вырезаемого контура можно определить по формуле

$$R = \frac{D}{2 \sin \beta_{\min}}, \quad (2.11)$$

где β – угол между образующей конуса и его осью; при $\beta = 45^\circ$ $R_{\min} = 0,71D$.

На практике принимают следующие размеры ножей: для тонких материалов ($s < 5$ мм) $D = 20s, H = 10 \dots 15$ мм; для толстых заготовок ($s > 10$ мм) $D = 12s, H = 40 \dots 60$ мм. Вертикальный и горизонтальный зазоры соответственно: $c < 0,3s$ и $z < 0,2s$.

Если заготовку зажимают во вращающихся центрах, то вырезкой на дисковых наклонных ножницах получают круглую заготовку.

Для вырезки заготовок, контур которых имеет один знак кривизны, применяют дисковые ножницы с наклонным нижним ножом (рис. 2.14).

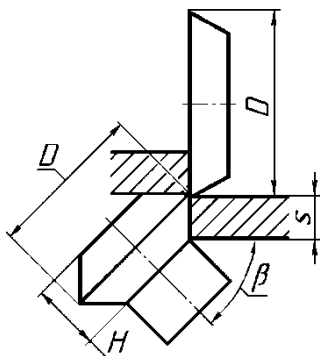


Рис. 2.14. Дисковые ножницы с наклонным нижним ножом

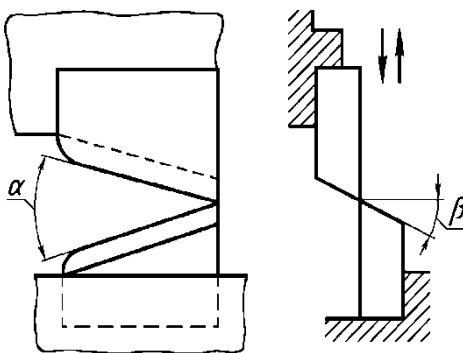


Рис. 2.15. Вибрационные ножницы

Для вырезки используют и вибрационные ножницы (рис. 2.15), представляющие собой небольшие гильотинные ножницы с малым



рабочим ходом (2...3 мм) и большим числом ходов (1000...2500 в минуту). Нижний наклонный нож закреплен на станине неподвижно, а верхний совершает возвратно-поступательное движение. Длина ножей равна 25...40 мм. Угол створа ножей α у вибрационных ножниц составляет $24^\circ \dots 30^\circ$, что больше угла трения и требует принудительной подачи заготовки к ножам.

Большой угол створа и малый заход режущих кромок (0...1,5 мм) относительно друг друга дают малую площадь контакта поверхности среза с боковой поверхностью ножа. Это в совокупности с большим зазором между ножами (0,20 ... 0,25)с облегчает поворот заготовки относительно ножей и позволяет вырезать контуры с малыми радиусами кривизны (до 12...15 мм). Задний угол режущих кромок составляет $6^\circ \dots 7^\circ$. Толщина разрезаемого материала обычно не превышает 3 мм, а точность размеров вырезаемых заготовок или деталей соответствует примерно 9-му классу.

К недостаткам резки на вибрационных ножницах можно отнести то, что быстрое затупление ножей и прерывистость процесса резания ухудшают качество поверхности среза.

Ножницы используют при отрезке крупных заготовок, а отрезку мелких заготовок в условиях серийного и массового производства осуществляют в штампах.

2.4. Вырубка и пробивка

Вырубкой и пробивкой называют разделительные операции, при которых осуществляется полное отделение части листовой заготовки в штампе по замкнутому контуру. При вырубке получают наружный контур детали, т.е. отделяемая часть является деталью (заготовкой, полуфабрикатом). При пробивке получают внутренний контур, а отделяемый материал является отходом. Например, при производстве шайб наружный контур получают вырубкой, а внутреннее отверстие – пробивкой.

Вырубку и пробивку в традиционном виде выполняют в штампах с помощью жесткого рабочего инструмента: пуансона и матрицы (рис. 2.16). Полученные вырубкой и пробивкой заготовки с характерными участками показаны на рис. 2.17. Разделение металла проходит в три стадии.

На первой стадии осуществляется упругая деформация до начала пластической. Пуансон производит сжатие металла, появляется упругий прогиб, и металл слегка вдавливается в отверстие матрицы.



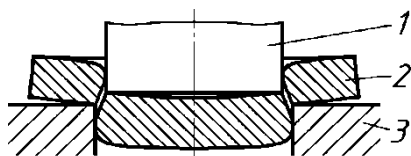


Рис. 2.16. Схема вырубki и пробивки по традиционной схеме: 1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

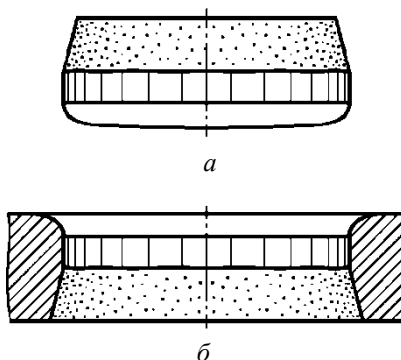


Рис. 2.17. Заготовки, полученные вырубкой (а) и пробивкой (б)

На второй стадии протекает пластическая деформация. Вблизи режущих кромок пуансона и матрицы создается концентрация напряжений, которая вызывает течение металла и образование зоны смятия.

Третья стадия характеризуется разделением, когда напряжения в металле превышают сопротивление срезу. У режущих кромок появляются скалывающие трещины, после чего происходит полное отделение вырубаемого (пробиваемого) контура.

Для окончательного удаления вырубленной детали из заготовки необходимо преодолеть сопротивление сил трения, возникающих между поверхностями среза взаимно смещенных частей, а также между металлом и рабочими частями штампа.

Качество полученных деталей определяется точностью наружных и внутренних контуров, качеством поверхности среза, размером торцевого заусенца, величиной утяжин вблизи поверхности среза, а также искажением заготовки вследствие изгиба. Основными факторами, влияющими на качество полученных деталей, являются: размер перемычек при раскрое материала; величина зазора между режущими кромками; твердость режущего инструмента и степень остроты режущих кромок; конструкция штампа; наличие смазочного материала.

Схема действующих сил на пуансон и матрицу, размеры очага пластической деформации и схемы напряженного состояния приведены на рис. 2.18. В очаге пластической деформации, ширина которого составляет 0,4...0,6 от толщины материала, можно выделить две зоны. Первая располагается вблизи режущих кромок и характеризуется объемной схемой напряжений, два из которых сжимающие, третье –



растягивающее (не путать с нумерацией главных напряжений). Вторая зона расположена в средней части очага деформации. Здесь схема напряжений плоская с разноименными напряжениями.

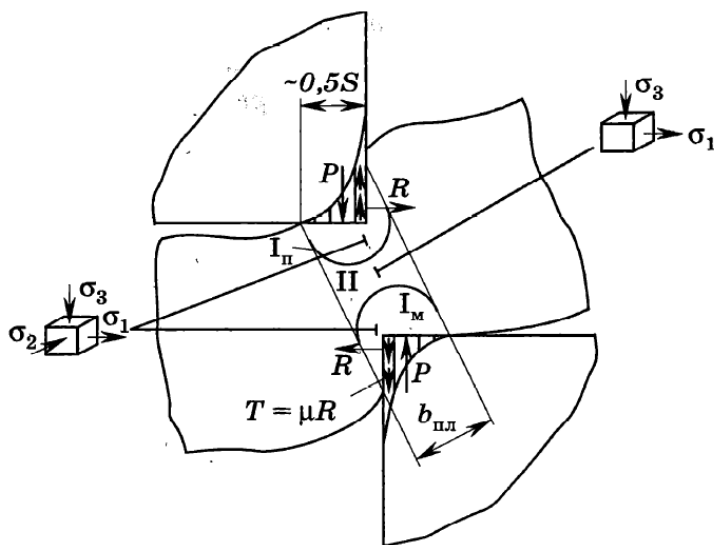


Рис. 2.18. Схема нагружения при вырубке и пробивке

Сила вырубki и пробивки. Сила вырубki и пробивки в штампах, так же как и при резке ножницами, зависит от формы режущих кромок пуансона и матрицы, которые могут быть параллельными или наклонными (скошенными). При параллельных режущих кромках процесс разделения материала заготовки осуществляется одновременно по всему периметру и технологическая сила вырубki:

$$P = L\sigma_{\text{ср}}, \quad (2.12)$$

где L – периметр вырубаемой детали. Как видно из (2.12), сила вырубki-пробивки прямо пропорциональна периметру вырезаемого контура. При малых отношениях L/S может наблюдаться снижение стойкости пуансона, а при больших отношениях сила деформирования может превысить допустимую для используемого оборудования.

При больших силах вырубki-пробивки для улучшения условий работы штампа может потребоваться снижение деформирующих сил. Для рабочей пары «пуансон-матрица» уменьшить эти силы можно, изготовив инструмент с наклонными режущими кромками (по анало-



гии с гильотинными ножницами) (рис. 2.19). Резание будет осуществляться неодновременно по всему контуру.

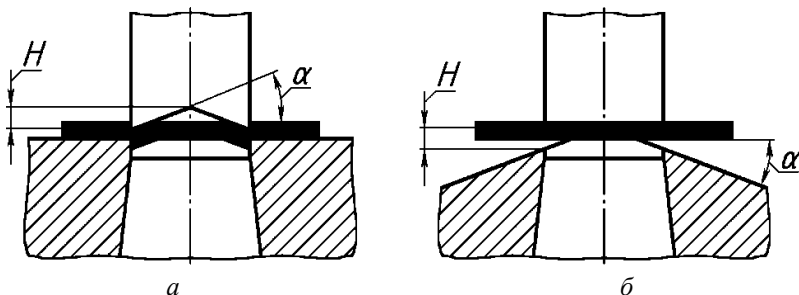


Рис. 2.19. Скошенные режущие кромки на пуансоне при пробивке (а) и на матрице при вырубке (б)

Скосы режущих кромок целесообразно делать симметричными для того, чтобы горизонтальные составляющие силы резания взаимно уравновешивались и не вызывали смещения заготовки относительно режущих кромок и появления боковых сил, изгибающих пуансон. Уравновешивание составляющих силы позволяет использовать большие значения угла створа режущих кромок по сравнению с отрезкой на гильотинных ножницах.

Однако в этом случае часть заготовки будет изгибаться. Чтобы избежать изгиба детали, необходимо делать скосы только на одном из сопряженных инструментов: при пробивке – на пуансоне (рис. 2.19, а), а при вырубке – на матрице (рис. 2.19, б).

Величину скоса матрицы или пуансона H и угол скоса α обычно выполняют в зависимости от толщины штампуемого материала. Для материалов толщиной до 3 мм принимают $H = (2 \dots 3)s$ и $\alpha = 2^\circ \dots 5^\circ$; при этом сила вырубко-пробивки снижается на 30...45 % по сравнению с силой при параллельных режущих кромках. Для материалов толщиной свыше 3 мм принимают $H = (1 \dots 2)s$ и $\alpha = 5^\circ \dots 8^\circ$, а сила снижается на 50...65 %. Характер изменения силы при движении пуансона с наклоном режущих кромок внутрь показан на рис. 2.20.

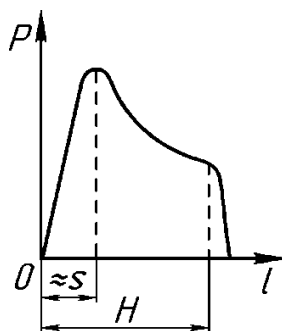


Рис. 2.20. Изменение силы резания при скошенных режущих кромках



После разделения материала дальнейшее движение пуансона сопровождается действием сил трения в области контакта блестящего пояска заготовки с поверхностью пуансона и пояском матрицы. Сумма этих сил составляет силу проталкивания $P_{пр}$ заготовки в матрицу.

При обратном движении пуансона часть отделенного материала, охватывающего пуансон, должна быть снята с него. Для этого требуется преодолеть силы трения, действующие на боковую поверхность пуансона. Эти силы составляют силу съема P_c .

Силы $P_{пр}$ и P_c , как и сила вырубки в основном зависят от рода материала, его толщины, формы и размеров вырубаемого контура, от величины зазора и степени смазки материала. Поэтому для упрощения расчетов принято выражать силы $P_{пр}$ и P_c в процентном соотношении от силы вырубки и пробивки: $P_{пр} = k_{пр}P$, $P_c = k_cP$, где $k_{пр}$ – коэффициент, устанавливающий соотношение между $P_{пр}$ и P ; n – количество деталей, одновременно проталкиваемых через поясок матрицы; k_c – коэффициент, определяемый в зависимости от типа штампа и толщины материала (табл. 2.3).

Т а б л и ц а 2.3

Значения коэффициента снятия k_c

Толщина материала, мм	Коэффициент k_c в зависимости от типа штампа		
	однопуансонный вырубной или пробивной	последовательный (пробивка-вырубка)	многопуансонный пробивной
До 1	0,02...0,06	0,06...0,08	0,10...0,12
Свыше 1 до 5	0,06...0,08	0,10...0,12	0,12...0,15
Свыше 5	0,08...0,10	0,12...0,15	0,15...0,20

Коэффициент $k_{пр}$ для материалов толщиной 0,5...4,0 мм составляет: для стали 0,03...0,07; меди и латуни 0,02...0,04; алюминия 0,03...0,05; дуралюмина 0,03...0,07. Для более тонких материалов следует брать значения ближе к верхнему пределу, а для более толстых – к нижнему.

Работа вырубки и пробивки для инструмента с параллельными режущими кромками определяется согласно формуле для отрезки на ножницах с параллельными ножами. Работа для инструмента со скошенными кромками несколько больше вследствие изгиба отделяемого отхода.



2.4.1. Раскрой материала

Раскрой материала при вырубке зависит в большей степени от конструкции штампуемой детали, что также следует учитывать при разработке конструкции детали. От типа раскроя материала зависит экономия металла, особенно в условиях крупносерийного и массового производства. Раскрой материала является первой операцией в технологическом процессе, связанной с потерями металла. Часто доля отходов на стадии раскроя является наибольшей по сравнению с отходами на последующих операциях.

Различные способы раскроя материала по экономичности и величине технологических отходов могут быть разделены на три вида:

1) раскрой с отходами, когда вырубка происходит по всему контуру детали, а перемычка имеет замкнутую форму (рис. 2.21, а);

2) малоотходный раскрой, когда вырубается или отрезается только часть контура детали, а в отход идет или перемычка между вырубками, или только боковая перемычка (рис. 2.21, б);

3) безотходный раскрой, когда вырубается деталь получается путем прямолинейной или криволинейной отрезки без образования перемычки (рис. 2.21, в).

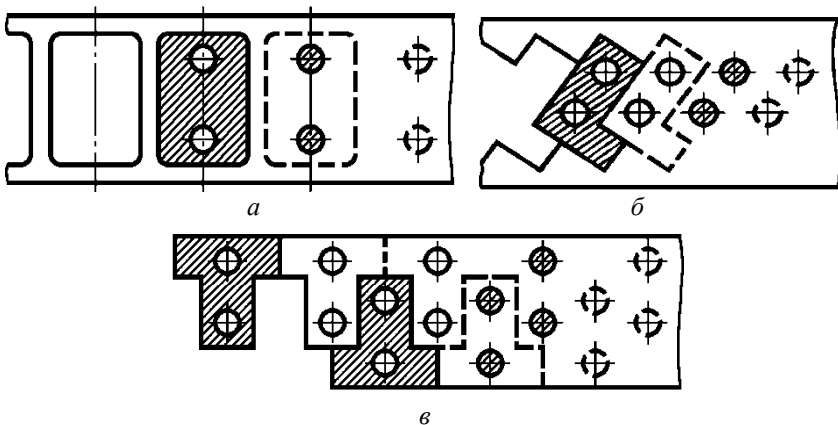


Рис. 2.21. Способы раскроя по экономичности: а – с отходами; б – малоотходный; в – безотходный

Отходы от пробивки отверстий или окон, а также отходы в начале и конце листа или полосы, влияющие на общий коэффициент использования металла, зависят исключительно от конструкции детали



и не характеризуют сам способ раскроя. Эти отходы неизбежны и почти неизменны при любом способе раскроя.

Для экономии металла основное значение имеют технологические отходы, зависящие от способа раскроя и определяющие его экономичность.

По характеру расположения вырезаемых деталей можно выделить следующие основные способы раскроя: прямой однорядный, прямой наклонный, многорядный; встречный прямой, встречный наклонный, комбинированный (для двух или более различных деталей), с вырубкой перемычки (рис. 2.22).

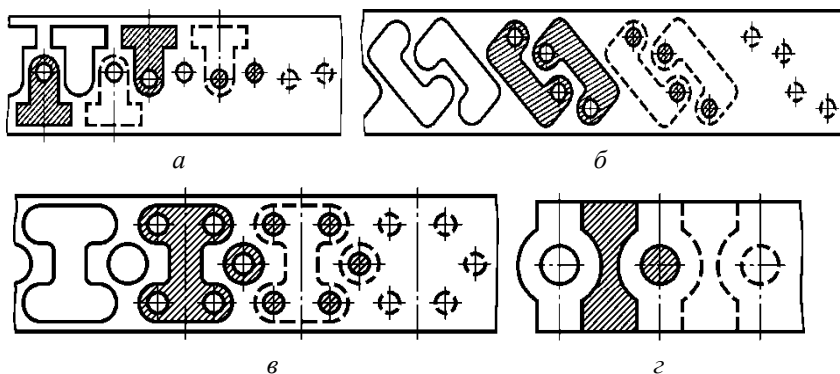


Рис. 2.22. Способы раскроя по характеру расположения заготовок:
a – встречный прямой; *б* – встречный наклонный; *в* – комбинированный;
г – с вырубкой перемычки

При вырубке круглых заготовок можно использовать следующие типы раскроя: однорядный, многорядный с параллельным и шахматным расположением заготовок (рис. 2.23).

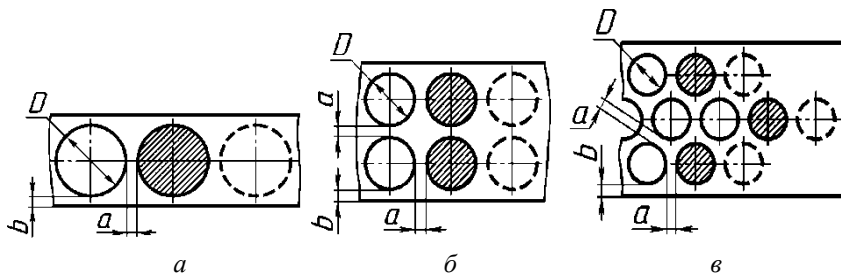


Рис. 2.23. Способы раскроя круглых заготовок: *a* – однорядный;
б – многорядный параллельный и *в* – многорядный шахматный



Величина перемычки существенно влияет на процесс вырубki и качество изделия. Основное назначение перемычек – компенсировать погрешности подачи материала и его фиксации в штампе с тем, чтобы предотвратить получение бракованных деталей, т.е. чтобы не произошло наложение контуров соседних деталей.

С точки зрения силы, необходимой для снятия материала с пуансона, выгодно работать с возможно наименьшими перемычками. Кроме того, они являются прямой потерей материала, поэтому их ширина должна быть наименьшей. С другой стороны, перемычка должна обеспечить достаточную жесткость полосы или ленты при работе, чтобы не произошел разрыв. Величина перемычки также влияет на стойкость штампа: при недостаточной ширине перемычки стойкость штампа уменьшается.

Ширина перемычки зависит от: толщины и твердости материала, размеров и конфигурации детали, от типа раскроя, способа подачи полосы в штамп на позицию вырубki, от типа упора штампа.

Размеры перемычек между деталями a и боковых перемычек b (см. рис. 2.23) в зависимости от толщины штампуемого материала представлены в табл. 2.4.

Т а б л и ц а 2.4

Размеры перемычек при раскрое деталей, мм

s	a	b
Свыше 0,2 до 0,5	1,2...2,5	1,5...3,0
Свыше 0,5 до 4,0	1,0...3,2	1,3...3,6
Свыше 4,0 до 10,0	3,2...7,0	3,6...8,0

Оценку экономичности того или иного типа раскроя производят посредством коэффициента раскроя K_p :

$$K_p = \frac{Fn_p}{Lh} \cdot 100\%,$$

где F – площадь поверхности детали, включая внутренние отверстия; h – шаг вырубki (раскроя); L – ширина полосы; n_p – количество рядов раскроя.

Наиболее экономичным будет раскрой с наибольшим значением K_p . В случае комбинированного раскроя в качестве площади F берется сумма площадей вырубаемых деталей.

Коэффициент раскроя не дает полного представления об общей величине полезного использования материала. Эта величина опреде-



ляется общим коэффициентом использования металла $K_{и}$. При штамповке из полосы или ленты

$$K_{и} = \frac{F_{д} n}{AB} \cdot 100\%,$$

где $F_{д}$ – площадь поверхности детали без отверстий; n – количество деталей, вырубленных из полосы или ленты с длиной A и шириной B .

Коэффициент использования материала $K_{и}$ почти всегда меньше коэффициента раскроя $K_{р}$ за счет того, что при раскрое, как правило, присутствуют концевые отходы и часто вырезаемая деталь содержит отверстия; при отсутствии концевых отходов и отверстий $K_{и} = K_{р}$.

Круглые заготовки диаметром $D > 150$ мм обычно вырубают в один ряд (см. рис. 2.23, а). При меньших размерах выгоднее штамповать в несколько рядов в шахматном порядке (см. рис. 2.23, в). $K_{и}$ при параллельном и шахматном расположении круглых деталей на полосе или ленте определяют по следующим зависимостям: при параллельном

$$K_{и} = \frac{n_{р} \cdot 0,785D^2}{(D + a)[n_{р}D + 2b + a(n_{р} - 1)]} \cdot 100\%;$$

при шахматном

$$K_{и} = \frac{n_{р} \cdot 0,785D^2}{(D + a)[(D + 2b) + (n_{р} - 1)(D + a) \cos \alpha]} \cdot 100\%.$$

где α – угол наклона.

Величина $K_{и}$ повышается при увеличении числа рядов вырубки и уменьшении размеров перемычек. Значительное повышение $K_{и}$ металла в случае шахматного расположения заготовок при многорядном раскрое наблюдается, когда число рядов увеличивается до семи. Дальнейшее увеличение дает сравнительно небольшую экономию материала.

2.4.2. Чистовая вырубка и пробивка

Обычная вырубка-пробивка листового материала дает неровную, слегка криволинейную и шероховатую поверхность среза. Шероховатость поверхности в среднем составляет для блестящего пояска R_a 2,5...0,63 мкм (6, 7-й классы), а для зоны скалывания R_z 80...20 (3–5-й классы) по ГОСТ 2789-73.

В ряде случаев требуется изготовить штампованную деталь повышенной точности (3, 2-й класса) с гладкой и перпендикулярной



поверхностью среза по всей высоте с шероховатостью поверхности R_a 0,63...0,32 мкм (8-й класс). Зачастую это достигается последующей доработкой на фрезерных, шлифовальных станках, что малопроизводительно и дорого.

Наиболее экономичными способами в крупносерийном и массовом производстве являются чистовая вырубка-пробивка и зачистка. Это дает значительные преимущества по сравнению с механической обработкой резанием.

Увеличения высоты блестящего пояска и гладкости поверхности среза добиваются в основном двумя путями: уменьшением концентрации напряжений у режущей кромки, повышением пластичности материала за счет увеличения действия всестороннего сжатия.

Первый путь может быть частично реализован за счет притупления (заваливания) или закругления одной из сопряженных режущих кромок пуансона или матрицы (рис. 2.24). Другая режущая кромка должна оставаться острой во избежание образования торцевых заусенцев. При вырубке притупляют режущую кромку матрицы, а при пробивке – пуансона.

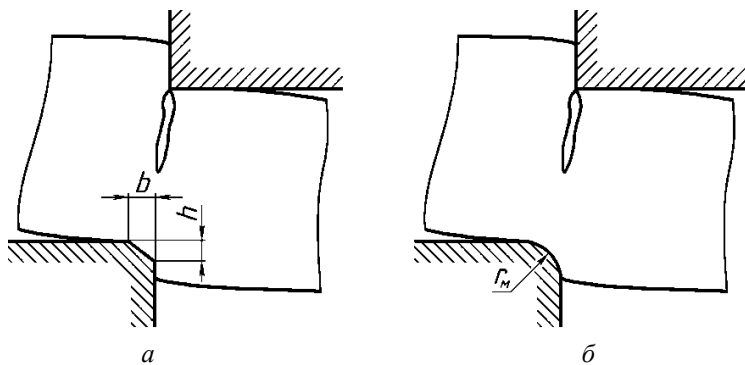


Рис. 2.24. Чистовая вырубка и пробивка путем заваливания (а) или закругления (б) одной из режущих кромок

Особенностями этого варианта является то, что, во-первых, трещина зарождается у острой режущей кромки и приходит на скругленную кромку сопряженного инструмента, во-вторых, некоторый избыток металла при дальнейшем движении рабочего инструмента сдвигается на боковые поверхности среза. Все это способствует увеличению высоты блестящего пояска. Однако из-за смещения избыточного металла увеличиваются нормальные контактные напряжения, дейст-



вующие на боковые стенки инструмента, а это способствует повышению износа инструмента. Такой способ иногда называют чистой вырубкой и пробивкой с обжимкой.

Форма завала матрицы подбирается в зависимости от рода и толщины вырубаемого материала, а также от формы изделия. Высота завала h берется в пределах $(0,2 \dots 0,5)s$, ширина завала b – в пределах $(0,1 \dots 0,2)s$ (рис. 2.24). В случае закругления режущей кромки радиус закругления r_m для материалов толщиной до 6 мм составляет $(0,2 \dots 0,3)s$. Зазор z между пуансоном и матрицей выбирается в пределах $0,01 \dots 0,02$ мм независимо от толщины материала. Высота цилиндрического пояса матрицы должна быть равна $2s$, а угол поднутрения принимается равным $1^\circ \dots 2^\circ$ на сторону. Матрица закаливается до твердости $HRC 62 \dots 64$, и внутренняя рабочая ее поверхность обрабатывается до шероховатости $R_a 0,16 \dots 0,1$ мкм. Такой способ чистой вырубki применяется в приборостроении и часовой промышленности при изготовлении деталей типа рычагов, храповиков, небольших шестерен малого модуля и других деталей из цветных металлов и мягкой стали.

Второй путь реализуется: 1) за счет вырубki и пробивki пуансоном, поперечные размеры которого больше поперечных размеров матрицы; 2) вырубкой и пробивкой со сжатием.

В первом случае (рис. 2.25) между торцами пуансона и матрицы образуется участок, находящийся в условиях всестороннего сжатия.

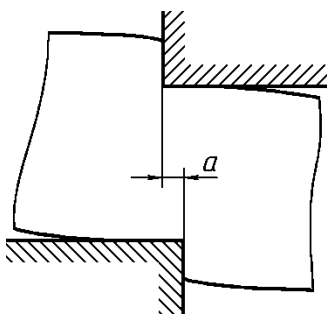


Рис. 2.25. Чистовая вырубка и пробивка с перекрытием режущих кромок

Устранение возможности появления растягивающих напряжений повышает пластичность материала, благодаря чему трещины у режущих кромок возникают при большем внедрении пуансона, чем при нормальном, или вообще не образуются.

Чем больше размер перекрытия кромок a , тем больше всестороннее сжатие в очаге деформации и тем больше контактные напряжения и сила деформирования. Оптимальные размеры перекрытия a определяются как минимально необходимые для исключения образования трещин опережающего разрушения. Обычно рекомендуется устанавливать для круглых деталей $a = (0,10 \dots 0,15)s$.



Для деталей сложной конфигурации (рис. 2.26) перекрытие a' для материалов толщиной $0,5...3,0$ мм принимается равным $0,10...0,25$ мм, а для толщин $3,0...6,0$ мм – $0,30...0,55$ мм. В местах острых и резких переходов по наружным углам a' следует принимать в $1,5...2,0$ раза больше приведенных, а по внутренним углам – уменьшить вдвое.

В начале процесса штамповки пуансон осуществляет вырубку детали, а затем – зачистку. Из-за больших размеров пуансон не должен доходить до плоскости (зеркала) матрицы на некоторую величину, равную $(0,10...0,15)s$. Разделение частей заготовки происходит при обратном ходе пуансона, когда силы трения на боковых поверхностях пуансона и матрицы действуют в противоположных направлениях, отрывают одну часть заготовки от другой, разрушая оставшуюся при «недоходе» пуансона перемычку. В этом случае в зоне отрыва образуется шероховатый поясок скола.

Для улучшения качества поверхности среза и гарантированного отделения разделяемых частей рекомендуется применять ступенчатые пуансоны (рис. 2.27), у которых размер нижней ступени равен размеру отверстия матрицы (с учетом нормального зазора). В этом случае в заключительной стадии деформирования отделяемая часть заготовки полностью проталкивается в отверстие матрицы и рваной поверхности скола не возникает.

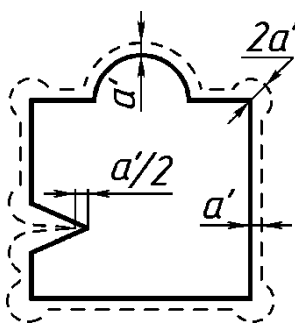


Рис. 2.26. Величина перекрытия для деталей сложной конфигурации

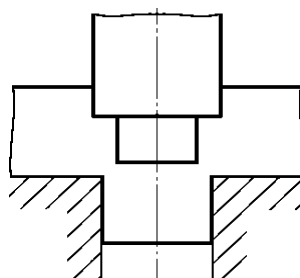


Рис. 2.27. Чистовая вырубка и пробивка ступенчатым пуансоном

Сила чистовой вырубки и пробивки P_n круглых деталей с перекрытием на $25...50$ % выше силы обычной вырубки (пробивки) P с нормальным зазором. Для деталей сложной конфигурации в зависимости от величины перекрытия a' сила чистовой вырубки и пробивки



P_n составляет: для алюминия (1,30 ... 1,60) P ; латуни (2,25 ... 2,80) P ; малоуглеродистой стали (2,40 ... 2,60) P .

Большее значение следует принимать для металла, имеющего поверхностный наклеп.

Достоинством этого способа является хорошая поверхность среза с шероховатостью до R_a 0,63...0,25 мкм и незначительная утяжка – не более (0,10 ... 0,15) s . К его недостаткам относятся затруднение при вырубке контуров, имеющих глубокие впадины; повышенная сила вырубki (пробивки) и пониженная стойкость рабочего инструмента. При проектировании штампа необходимо учитывать, что деталь при выходе из матрицы вследствие упругой разгрузки увеличивается в размерах на 0,02...0,06 мм.

Чистовая вырубка со сжатием (или с поперечной осадкой) выполняется в условиях, когда свободные поверхности в очаге деформации отсутствуют и заготовка зажата между торцами пуансона и выталкивателя, а также матрицы и прижима (рис. 2.28).

Этот способ является наиболее совершенным при получении деталей с гладкой и хорошей поверхностью среза. При этом давление, передаваемое прижимным кольцом на заготовку, должно быть не менее предела текучести штампуемого металла. Для локализации напряжений сжатия в очаге деформации на прижимном кольце делают клиновидные ребра (см. рис. 2.28) для штамповки материалов с толщиной до 3...4 мм, а для более толстых материалов такие же ребра выполняют и на матрице. При таком высоком давлении, которое создается со стороны прижимного кольца, в очаге деформации заготовки возникает неравномерное сжатие, повышающее пластические свойства металла. Благодаря этому увеличивается высота блестящего пояса и трещины могут не возникать.

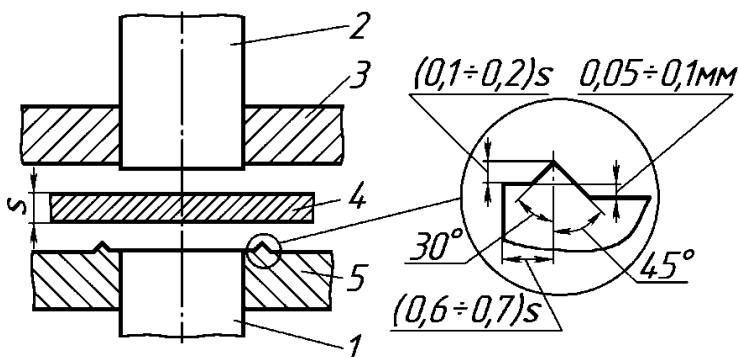


Рис. 2.28. Чистовая вырубка со сжатием



Чистовая вырубка со сжатием требует использования специализированных прессов и сложных штампов, а именно прессов тройного действия, автономно развивающих силы вырубки, прижима и проталкивания. Последовательность движения рабочих элементов штампа следующая. Сначала прижимное кольцо 5 (рис. 2.28) прижимает заготовку 4 к матрице 3, при этом происходит внедрение клиновидных ребер в штампуемый материал. Далее пуансон 1 вырубает деталь по контуру и проталкивает ее в отверстие матрицы, преодолевая противодействие контрпуансона 2. При обратном ходе отход освобождается от прижимного кольца, а деталь выталкивается из матрицы контрпуансоном и удаляется из рабочего пространства штампа.

При чистовой вырубке со сжатием зазор между пуансоном и матрицей составляет 0,005...0,010 мм, что существенно меньше по сравнению с обычной вырубкой. Для улучшения качества поверхности среза рекомендуется применение смазочных материалов и притупление режущей кромки матрицы радиусом (0,05 ... 0,10)s.

Чистовой вырубкой со сжатием изготавливаются детали из цветных металлов и сплавов, а также из низко- и среднеуглеродистых сталей толщиной до 10...12 мм. Шероховатость поверхности среза соответствует R_a 1,25...0,63 мкм для цветных материалов и R_a 2,5...1,25 мкм для стали.

Сила, требующаяся для чистовой вырубки со сжатием, обычно составляет от 1,5 до 3,0 расчетной силы вырубки с нормальным зазором. Общая сила $P_{сж}$ определяется суммой составляющих:

$$P_{сж} = P_p + P_{вд} + P_{пр},$$

где P_p – сила, необходимая для вырубки детали по контуру; $P_{вд}$ – сила вдавливания клиновидного ребра в штампуемый материал; $P_{пр}$ – сила нижнего прижима.

Силовой режим вырубки со сжатием значительно отличается от режима обычной вырубки. Сопротивление срезу $\sigma_{ср}$ в данном случае значительно выше вследствие того, что вырубка происходит при весьма малом зазоре, а также в результате вдавливания клиновидного ребра, изменяющего напряженное состояние в зоне среза. Рекомендуется при подсчете силы P_p величину $\sigma_{ср}$ определять из выражения

$$\sigma_{ср} = \left(m \frac{s}{D} + 0,75\right) \sigma_B \approx \left(5 \frac{s}{D} + 1,25\right) \sigma_T,$$

где $m = 3$ при $z = 0,005s$; $m = 2,85$ при $z = 0,01s$.



Величина P_p , а не суммарная сила $P_{сж}$, является основной характеристикой для выбора прессового оборудования.

Сила вдавливания клинового ребра $P_{вд}$ составляет значительную величину и может определяться по эмпирической формуле $P_{вд} \approx 4\sigma_b l h$, где l – длина контура ребра; h – высота ребра. Сила нижнего прижима $P_{пр} = Fq$, где F – площадь поверхности детали; q – давление прижима, составляющее от 30 до 70 МПа.

Суммарная работа, совершаемая при чистовой вырубке с прижимом:

$$A_{сж} = A_p + A_{вд} + A_{пр} = (P_p + Fq)s + 2\sigma_b l h^2,$$

где $A_p, A_{вд}, A_{пр}$ – работы резания, вдавливания клина и прижима соответственно. Приблизительно суммарная работа, затрачиваемая при вырубке со сжатием, в 2...3,5 раза больше работы, затрачиваемой при обычной вырубке.

К недостаткам этого способа можно отнести повышение расхода материала из-за наличия клиновых ребер, а также сравнительно невысокую производительность и дороговизну используемого прессового оборудования.

2.4.3. Определение исполнительных размеров инструмента при вырубке и пробивке

При вырубке размеры получаемой детали определяет матрица. При пробивке размер отверстия зависит от размеров пуансона. Схема назначения размеров приведена на рис. 2.29.

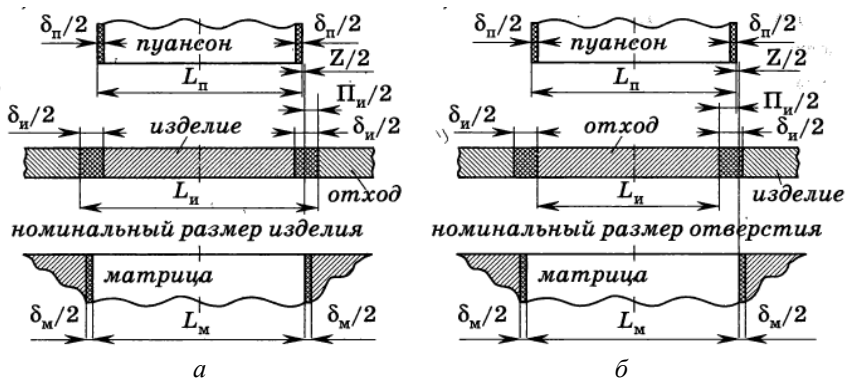


Рис. 2.29. Схемы к расчету исполнительных размеров матрицы и пуансона при вырубке (а) и пробивке (б)



При вырубке основной деталью является матрица, размеры ее рабочего отверстия в результате износа увеличиваются, поэтому начальный размер следует назначить меньше номинального (максимального) размера изделия, используя его поле допуска:

$$L_M = (L_I - \Pi_I)^{+\delta_M},$$

L_M – номинальный расчетный размер матрицы; L_I – номинальный размер детали; Π_I – припуск на износ матрицы; δ_M – допускаемое отклонение на размер матрицы.

Величина припуска на износ назначается из следующих условий: при допускаемом отклонении на размер изделия $|\delta_I| \leq 0,1$ мм припуск $\Pi_I = |\delta_I|$, при $|\delta_I| > 0,1$ мм $\Pi_I = 0,8|\delta_I|$ ($|\delta_I|$ – абсолютное значение поля допуска на размер детали). Размер пуансона при вырубке назначают меньше соответствующего размера матрицы на величину минимального оптимального двустороннего зазора:

$$L_{\Pi} = (L_M - Z_{\min})_{-\delta_{\Pi}},$$

где L_{Π} – номинальный расчетный размер пуансона; δ_{Π} – допускаемое отклонение на размер пуансона; Z_{\min} – минимальный двусторонний зазор между матрицей и пуансоном.

В некоторых источниках приведены другие рекомендации:

$$\begin{aligned} \Pi_I &= |\delta_I|, \text{ если } S_0 < 1 \dots 2 \text{ мм;} \\ \Pi_I &= 0,8|\delta_I|, \text{ если } S_0 > 1 \dots 2 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Допуски на размеры инструмента назначают на 2...4 качества выше, чем на размеры детали.

При пробивке сначала назначают размеры пуансона с учетом его износа в процессе пробивки (размеры пуансона уменьшаются). Затем определяют размеры матрицы, увеличивая размеры пуансона на величину двустороннего зазора.

Если форма детали (отверстия) сложная (рис. 2.30), то различные размеры инструмента в процессе износа или увеличиваются, или уменьшаются. В этом случае используют немного более сложный алгоритм назначения исполнительных размеров инструмента, приводимый во многих учебных и справочных изданиях.



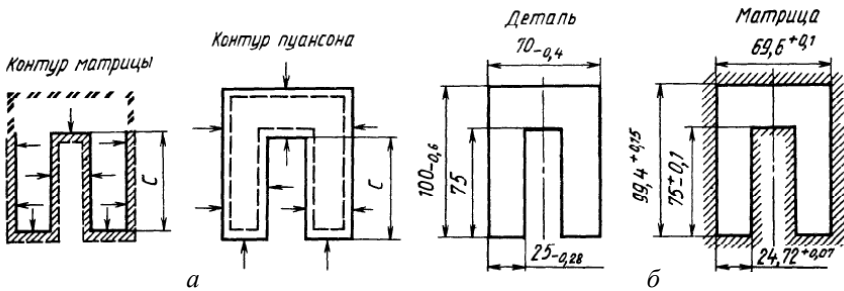


Рис. 2.30. Направления изнашивания инструмента при вырубке (а), размеры детали и соответствующие размеры детали (б)

2.4.4. Конструкции матриц и пуансонов

На рис. 2.31 приведены типовые конструкции матриц для выруб-ки и пробивки.

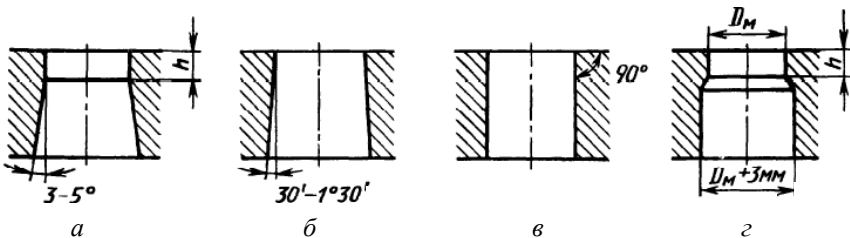


Рис. 2.31. Матрицы для пробивки и вырубки

Матрицы типа *a* применяют при штамповке деталей сложной формы или повышенной точности. Высота пояска h зависит от толщины заготовки и изменяется от 3 до 15 мм при соответственном изменении толщины заготовки от 0,5 до 10 мм, угол конусности провального отверстия – $3^\circ \dots 5^\circ$. Данный тип провального отверстия обеспечивает стабильность размеров штампуемой детали после перешлифовки матрицы, однако долговечность матриц невелика.

Матрицы типа *б* применяют при получении небольших деталей простой формы и невысокой точности, так как при перешлифовке рабочее отверстие матрицы увеличивается (при сошлифовке на 3 мм размер отверстия увеличивается на 0,1 мм). Угол конусности рабочего отверстия – от $15'$ до 1° , долговечность матрицы выше, чем матрицы с рабочим отверстием типа *a*.



Матрицы типа *в* применяют при штамповке с обратным выталкиванием детали на поверхность матрицы (в большинстве случаев в штампах совмещенного действия).

Матрицы типа *г* применяют для пробивки отверстий диаметром до 40 мм. Высота *h* цилиндрического пояса матрицы должна быть не менее 3 мм, с увеличением толщины штампуемой детали высота пояса увеличивается; диаметр провального отверстия в матрице на 3 мм больше, чем диаметр *d* рабочего отверстия.

Различные формы рабочей части пуансонов для вырубki и пробивки приведены на рис. 2.32.

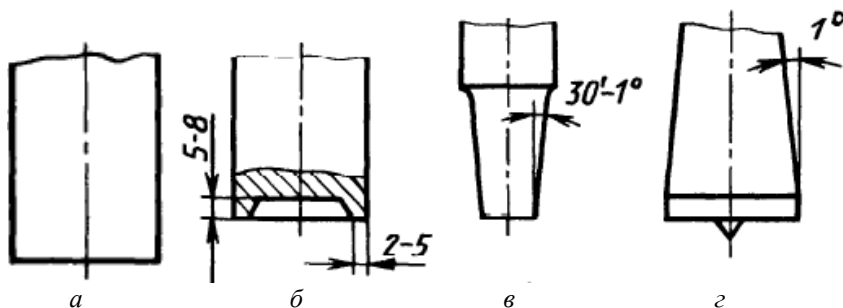


Рис. 2.32. Формы рабочей части пуансонов для пробивки и вырубki

Тип *а* наиболее прост, поэтому наиболее распространен. При диаметре пуансона свыше 50 мм на торцевой его части делается углубление для облегчения перешлифовки (тип *б*). Ширина кольцевой части пуансона должна быть шире очага пластической деформации, возникающего при вырубке-пробивке. Этому условию соответствует ширина 2...5 мм.

При пробивке отверстий в толстом листе ($s > 8$ мм) появляется необходимость уменьшить силу съема. Для этого рабочую часть пуансона делают слегка конусной с углом наклона образующей $30' \dots 1^\circ$ (тип *в*), а при необходимости уменьшить силу проталкивания и при пробивке отверстий по разметке керном (например, в мелкосерийном производстве) применяют пуансоны с обратным конусом в 1° и коническим выступом (тип *г*).

Пробивка отверстий, диаметр которых меньше толщины заготовки, вызывает возникновение сжимающих напряжений, превышающих критические, в связи с чем происходит потеря устойчивости, завер-



шающаяся разрушением пуансона. Поэтому основное условие при разработке конструкции штампа для пробивки относительно малых отверстий – устойчивость пуансонов. Выполнение этого условия обеспечивается направляющими для пуансонов по всей их длине в виде телескопических втулок, набора штифтов или шайб.

В зависимости от условий штамповки стойкость инструмента (до перешлифовки), изготовленного из инструментальной стали, составляет 50...500 тыс. ударов. Стойкость твердосплавного инструмента достигает 10^6 ударов и более.

Для уменьшения деформирующей силы вырубки и пробивки применяют различные способы, а именно: вырубку контура по частям, вырубку-пробивку пуансонами разной длины со ступенчатым расположением рабочих кромок и вырубку-пробивку при помощи пуансонов и матриц с наклонными (скошенными) кромками (см. рис. 2.19). Последний способ позволяет осуществлять процесс вырубки-пробивки постепенно (как при отрезке на ножницах с наклонным ножом), а не одновременно по всему отделяемому контуру. В результате этого сила вырубки-пробивки может быть уменьшена на 30...40%.

Для создания условий, при которых горизонтальные проекции сил вырубки и пробивки, приложенные к наклонно расположенным (скошенным) рабочим кромкам инструмента, могли бы уравновешиваться, скосы делают симметричными относительно оси инструмента. Это позволяет делать углы наклона рабочих кромок инструмента больше, чем при отрезке с односторонним наклоном режущей кромки ножа. В зависимости от характера операции (вырубки или пробивки) скосы выполняются на матрице или пуансоне (рис. 2.33).

Применение скосов вызывает изгиб той части металла, которая соприкасается с инструментом, имеющим наклонные рабочие кромки. Поэтому при вырубке скосы делаются на матрице, а при пробивке – на пуансоне.

При вырубке и пробивке деталей (или заготовок) диаметром свыше 250...300 мм из толстолистого металла (при $s/D > 0,1$) скосы предусматривают, как правило, на рабочих кромках матрицы. Число скосов (в виде периодически повторяющихся волн) зависит от размера матрицы (4 и более). Относительная высота скосов $H/s = 1...3$. Чем металл толще, тем относительная высота скоса меньше.



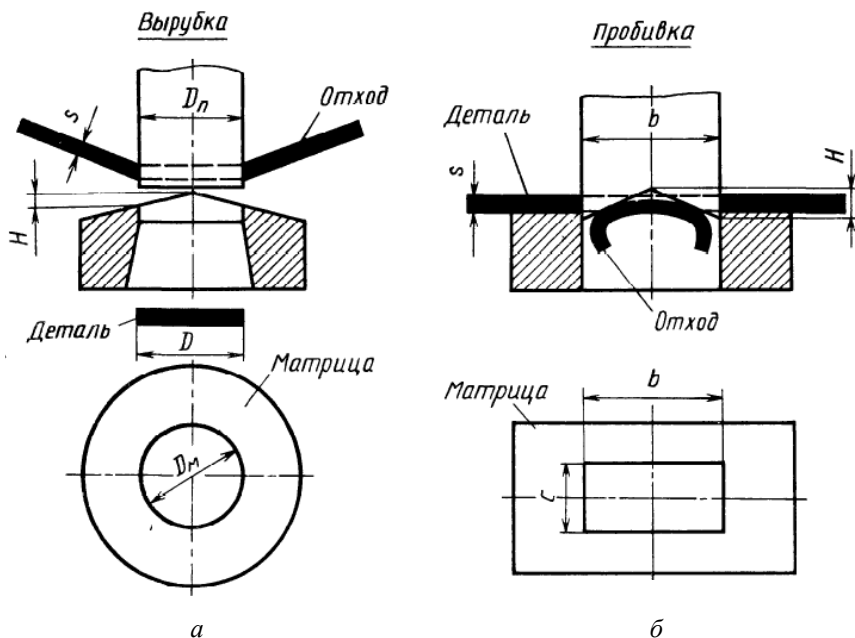


Рис. 2.33. Пуансоны и матрицы для вырубki (а) и пробивки (б) с наклонными (скошенными) рабочими кромками

2.5. Зачистка

Зачисткой называется разделительная операция, целью которой является отделение припуска со снятием стружки на боковых поверхностях полуфабриката, полученного вырубкой или пробивкой.

Вырубка со сжатием не всегда оказывается экономически целесообразной для получения деталей с точными размерами и гладкой боковой поверхностью. Достаточно хорошее качество вырубаемых деталей можно получить с применением операции зачистки. При зачистке качество поверхности среза повышается путем срезания припуска на боковых поверхностях детали и переводом части металла в стружку. Этот способ позволяет получать детали небольших размеров с точностью, соответствующей 2...4-му классу. Достигаемая при зачистке шероховатость поверхности обычно соответствует 7-му классу, а при зачистке деталей из пластичных цветных металлов и сплавов – 8-му классу шероховатости. Однако в большинстве случаев на



верхней кромке детали образуется небольшой скол, который отсутствует при чистовой вырубке (пробивке). Зачистке путем снятия припуска подвергаются как металлы, так и многие неметаллические материалы (гетинакс, фибра, текстолит и др.).

Зачистка по наружному контуру может быть выполнена следующими способами:

- 1) пуансоном меньше матрицы, когда матрица имеет размеры зачищаемой детали, а пуансон меньше этих размеров;
- 2) пуансоном больше матрицы, когда матрица имеет размеры зачищаемой детали, а пуансон – размеры заготовки;
- 3) обжимкой в конусной матрице или с заваленными режущими кромками;
- 4) вырубкой с зачисткой двумя матрицами, расположенными вертикально одна над другой.

Первый способ (зачистка срезанием припуска) наиболее распространен и широко применяется в приборостроении и точной индустрии (например, при производстве часовых шестеренок) для зачистки деталей весьма сложной конфигурации.

Процесс зачистки заключается в срезании небольшой стружки по контуру детали (рис. 2.34). Заготовка укладывается на матрицу закругленной стороной вниз, и при движении пуансона вниз кромками матрицы срезается припуск в виде стружки.

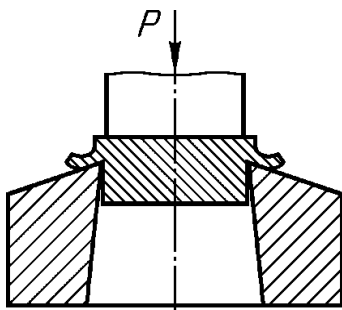


Рис. 2.34. Зачистка по наружному контуру пуансоном меньше матрицы

В зависимости от сложности контура обрабатываемой детали, рода и толщины материала зачистка может быть однократной и многократной. Для простого контура (без острых углов) детали толщиной до 3 мм для всех металлов ограничиваются одной

зачисткой. При сложном контуре (с острыми углами) для деталей из твердой стали толщиной до 3 мм требуются две операции, для всех металлов толщиной свыше 3 мм – две-три операции.

Зачистную матрицу изготавливают с цилиндрическим пояском высотой $h = 6 \dots 10$ мм и шероховатостью $R_a = 0,16 \dots 0,10$ мкм. Зазор между матрицей и пуансоном при зачистке принимают в пределах $0,008 \dots 0,010$ мм независимо от толщины и рода материала.



Чистота зачистки зависит от рода зачищаемого металла, остроты режущих кромок матрицы и величины припуска на зачистку.

Шероховатость поверхности среза достигает для латуни $R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм; для мягкой стали $R_a = 1,25 \dots 0,50$ мкм; для твердой стали $R_a = 2,5 \dots 1,25$ мкм. Для твердой стали лучшая шероховатость поверхности достигается при небольшом закруглении матрицы радиусом $r_m = (0,2 \dots 0,3)S$.

Увеличение в размерах деталей после выхода из матрицы ничтожно – около 0,005 мм.

В случае зачистки наружного контура пуансоном больше матриц предварительно вырубленную заготовку с размером больше зачистной матрицы на величину припуска укладывают в гнездо загрузочной планки на матрицу (рис. 2.35). При зачистке первой детали пуансон не доходит до плоскости матрицы на величину $h_m = (0,10 \dots 0,15)S$. Затем, при очередном ходе пуансона, последующая заготовка, проталкивая предыдущую в матрицу, производит ее зачистку.

Этот способ зачистки применяется преимущественно для деталей из цветных металлов и сплавов. Его достоинствами являются хорошая шероховатость поверхностей и меньшая стоимость изготовления рабочего инструмента штампа, поскольку не требуется строгой пригонки пуансона к матрице.

По третьему способу (при зачистке обжатием) зачистка производится путем прогонки предварительно вырубленной заготовки через конус матрицы ($1^\circ \dots 2^\circ$), переходящий в цилиндрический поясok (рис. 2.36). Часто вместо конусной матрицы используют матрицу с закругленными (заваленными) режущими кромками радиусом $r_m = (0,2 \dots 0,3)S$.

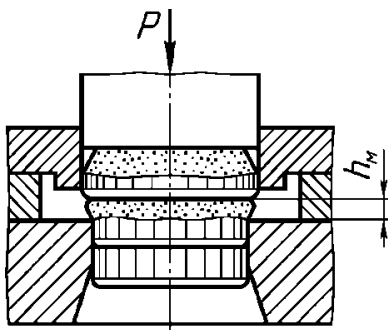


Рис. 2.35. Зачистка по наружному контуру пуансоном больше матрицы

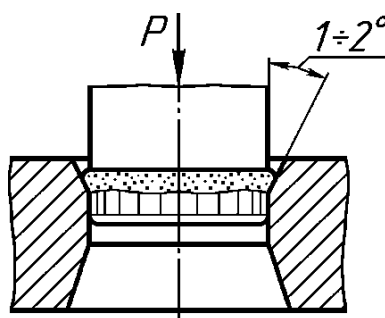


Рис. 2.36. Зачистка по наружному контуру обжатием в конусной матрице



Односторонний припуск на обжатие не должен превышать 0,06...0,08 мм во избежание поломки пуансона под действием значительных сил. Зазор между пуансоном и матрицей принимают равным порядку 0,1 мм.

Зачистка обжатием используется преимущественно для стальных деталей как окончательная чистовая операция. Матрицу для зачистки алюминиевых деталей (например, ложек) делают с фаской вместо закругления.

По четвертому способу комбинирование операций вырубкой и зачистки может осуществляться как объединением вырубкой с зачисткой

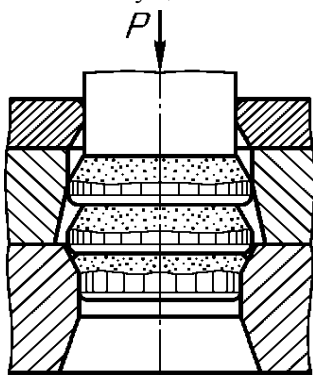


Рис. 2.37. Зачистка по наружному контуру вырубкой и зачисткой в двух матрицах

пуансоном больше матрицы, так и объединением вырубкой с зачисткой обжатием (рис. 2.37). Одновременную вырубку с зачисткой можно применять для деталей простой формы толщиной 0,5...5,0 мм, а для сложных – до 2 мм.

Качество зачищаемой поверхности в значительной степени зависит от толщины срезаемого слоя или припуска на зачистку. Деталь после вырубкой имеет вследствие неперпендикулярности поверхности среза два размера: один по матрице, другой по пуан-

сону, различающихся на величину зазора z . Для проведения качественной зачистки необходимо срезать с заготовки часть, соответствующую величине z , и некоторый дополнительный припуск y . Суммарный припуск $\delta = z + y$. Величина припуска на зачистку зависит главным образом от толщины и рода материала, а также от конструкции загрузочного устройства.

Величину припуска y на диаметр (или обе стороны) зачищаемого контура рекомендуется принимать:

- для латуни и мягкой стали $y = 0,10 \dots 0,40$ мм при $z = (0,05 \dots 0,07)s$;
- для стали средней твердости $y = 0,15 \dots 0,50$ мм при $z = (0,09 \dots 0,11)s$;
- для твердой стали $y = 0,15 \dots 0,60$ мм при $z = (0,12 \dots 0,15)s$.

При многократной зачистке припуски распределяют следующим образом: на первой зачистке 60 %, на второй 25...30 %, на третьей



10...15 % от общего припуска Δ , принятого для многократной зачистки.

Зачистка по внутреннему контуру осуществляется двумя способами: 1) зачисткой отверстий путем среза припуска (калибровкой), 2) одновременной пробивкой и зачисткой двухступенчатым пуансоном.

Первый способ принимается для зачистки точных отверстий небольшого диаметра (до 5 мм) при штамповке деталей приборов и часовых механизмов. Зачистка отверстий производится пуансоном без зачистной матрицы (рис. 2.38). В качестве матрицы используется обыкновенная плита с соответствующими отверстиями для удаления отхода. Обычно диаметр отверстия в плите $D > 1,5d$.

Возможность зачистки одним пуансоном без матрицы объясняется тем, что в этом случае снимается стружка незначительной толщины и необходимая сила в несколько раз меньше силы, необходимой для изгиба детали в зоне калибруемого отверстия.

Припуск на калибровку зависит главным образом от толщины и марки материала, а также от величины припуска на зачистку после предварительной пробивки или сверления отверстия. Величина припуска на калибровку Δ' для материалов толщиной 0,5...3,5 мм в случае предварительной пробивки отверстий при расстоянии между центрами зачищаемых отверстий от 10 до 40 мм составляет 0,10...0,20 мм, а при сверлении по закерненным углублениям – 0,16...0,20 мм. Для расстояний от 40 до 100 мм припуск Δ' соответственно равен 0,12...0,22 мм и 0,20...0,30 мм.

Припуск задают на максимальный размер отверстия, получающегося в заготовке со стороны матрицы при пробивке. Заготовка при зачистке калибровкой укладывается на матрицу закругленными кромками в верх к пуансону.

Величина усадки отверстия после калибровки составляет для цветных металлов 0,005...0,012 мм, для стали – 0,008...0,015 мм.

Точность обработки отверстия диаметром до 5 мм при калибровке составляет 0,01...0,03 мм. Шероховатость поверхности после обработки $R_a = 1,25 \dots 0,32$ мкм. Калибровочный пуансон закалывают до

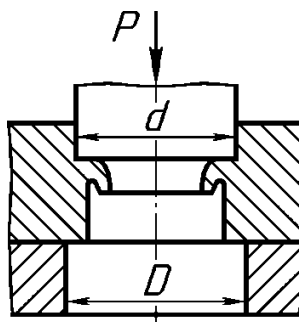


Рис. 2.38. Зачистка по внутреннему контуру путем среза припуска



HRC 62...64, а рабочую его поверхность обрабатывают на шероховатость $R_a = 0,16 \dots 0,10$ мкм.

Во втором случае при использовании двухступенчатого пуансона вначале происходит пробивка отверстия первой ступенью и удаление отхода, а затем зачистка второй ступенью (рис. 2.39). По такой схеме обеспечивается наилучшая точность обработки отверстия.

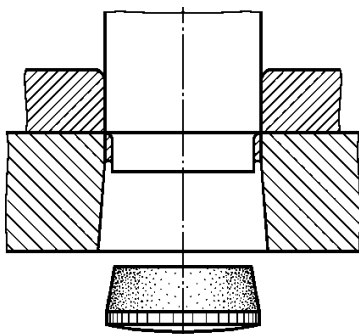


Рис. 2.39. Зачистка по внутреннему контуру путем пробивки и зачистки ступенчатым пуансоном

Сила зачистки P_3 с учетом сопротивления заготовки при проталкивании через отверстие матрицы может быть приближенно определена по формуле

$$P_3 = L[\Delta + (0,15 \dots 0,20)S]\sigma_{ср}.$$

2.6. Надрезка и обрезка

Надрезкой называют разделительную операцию, при которой происходит частичное отделение части заготовки по незамкнутому контуру с формоизменением отделяемой части. Некоторые разновидности надрезки представлены на рис. 2.40: *a* – надрезка с гибкой, а *б* – с растяжением. Часто надрезка используется для получения безотходных сеток. Для этого применяют пилообразный пуансон (нож) с поперечным возвратно-поступательным движением.

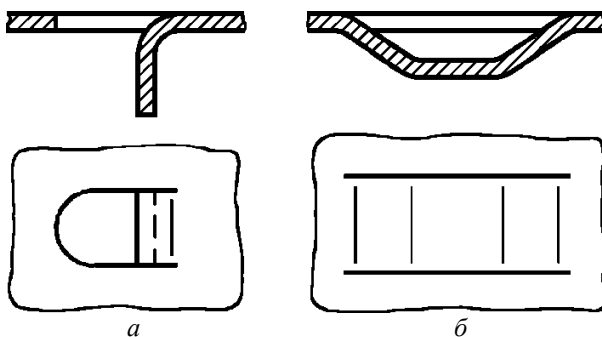


Рис. 2.40. Надрезка с гибкой (*a*) и растяжением (*б*)



При надрезке с гибкой пуансон обычно делают со скосом, а зазор между режущими кромками пуансона и матрицы принимают такими же, как и при обычной вырубке-пробивке. На участке изгиба заготовки зазор берется несколько больше толщины заготовки, а кромки пуансона и матрицы на этом участке имеют скругления.

При толщине заготовки более 1 мм в местах изгиба у границы линии резания могут образовываться трещины вследствие распирающего действия уширяющейся при изгибе части заготовки. Избавиться от трещин можно, если до надрезки в местах изгиба предварительно пробить отверстия, которые искусственно уменьшают ширину отгибаемой части.

При надрезке с растяжением удлинение отделяемой части заготовки не должно приводить к ее разрыву. Условно принимается, что разрушения не произойдет, если удлинение отделяемой части не превысит величину равномерного удлинения при испытании на растяжение.

При надрезке с растяжением, применяемой для изготовления безотходной сетки с ромбообразными отверстиями, отделяемые полосы также испытывают удлинение, что заставляет опытным путем подбирать размеры ячеек сетки, которые гарантировали бы отсутствие трещин и разрывов.

Сила надрезки может быть определена с использованием формул, приведенных при рассмотрении операций отрезки, вырубке-пробивки с учетом дополнительного сопротивления при изгибе или растяжении.

Обрезка – это отделение краевой части (припуска) полуфабриката, полученного формоизменяющими операциями.

В большинстве случаев для обеспечения заданных размеров после вытяжки полые детали подвергаются последующей обрезке кромок или фланца, для чего предусматривается специальный припуск на обрезку. Необходимость обрезки объясняется рядом причин: образованием фестонов вследствие анизотропии холоднокатаного металла; неточностью фиксации заготовки на матрице; неравномерностью толщины штампуемого материала, зазора и смазки и т.п. Без обрезки можно вытягивать лишь неглубокие детали. Обрезка может осуществляться дисковыми ножами или в штампах. При обрезке осесимметричных и неосесимметричных полуфабрикатов средних размеров могут использоваться двухдисковые ножницы, аналогичные применяемым при вырезке.

Обрезка дисковыми ножницами может применяться для полых заготовок с фланцем (рис. 2.41, *а*) и без него (рис. 2.41, *б*). Использо-



вание дисковых ножиц для обрезки целесообразно в мелко- и среднесерийном производстве, так как ножи и приспособления для перемещения обрезаемой заготовки сравнительно дешевы и просты. При обрезке осесимметричных полуфабрикатов небольших размеров (например, при производстве патронов), несмотря на массовый характер производства, используется обрезка с помощью дискового ножа, но на специализированном оборудовании (рис. 2.41, *в*). В этом случае отделение отхода осуществляется внедрением режущей кромки дискового ножа, причем сопряженной режущей кромкой является кромка оправки, поддерживающей заготовку изнутри. Такой вариант используют в условиях серийного производства.

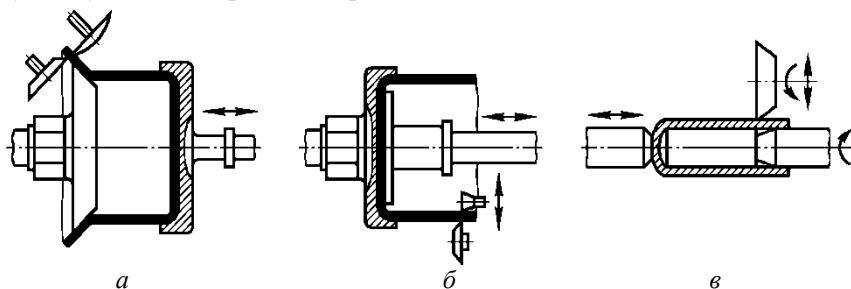


Рис. 2.41. Обрезка дисковыми ножами заготовок с фланцем (*а*), без фланца (*б*) и в патронном производстве (*в*)

Способы обрезки в штампах разнообразны. Обрезку припуска на полых полуфабрикатах без фланца, как правило, совмещают с вытяжкой и осуществляют ступенчатым пуансоном (рис. 2.42, *а*). Обрезка осуществляется на заключительной стадии вытяжки второй ступенью пуансона, имеющей режущие кромки. Отделение отхода осуществляется отрывом, что приводит к шероховатой поверхности. Оставшийся на пуансоне кольцевой отход снимается с пуансона съемником и удаляется из рабочей зоны штампа.

Обрезку припуска на полуфабрикатах с фланцем осуществляют по схемам, представленным на рис. 2.42, *б, в*. Величина зазора принимается такой же, как для вырубки.

По схеме *б* заготовка до обрезки фиксируется ловителем пуансона при его движении. Отделение отхода осуществляется режущими кромками пуансона и матрицы, как при обычной вырубке. Отделенная часть фланца в виде кольцевого пояса смещается по пуансону и в дальнейшем накопившийся отход срезается острыми кромками ножей-рассекателей, выполненных на пуансоне.



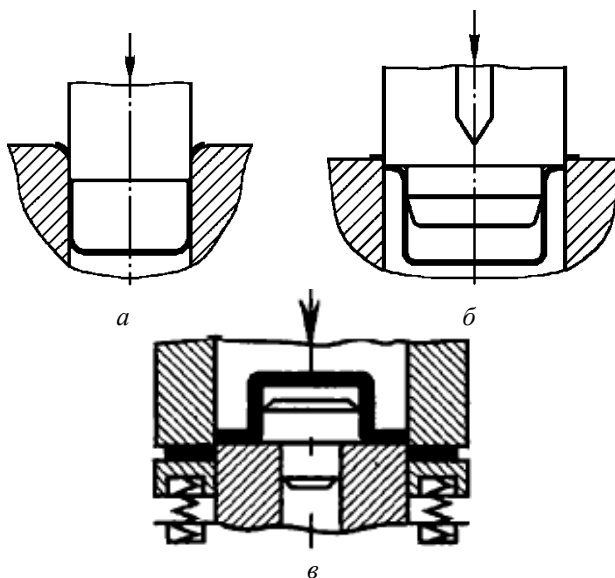


Рис. 2.42. Обрезка в штампе заготовок без фланца (а) и с фланцем (б, в)

Сила обрезки на дисковых ножницах рассчитывается, как для отрезки, а сила обрезки в штампах приближенно может быть определена, как для обычной вырубki.

3. ФОРМОИЗМЕНЯЮЩИЕ ОПЕРАЦИИ

3.1. Вытяжка без утонения

Вытяжкой без утонения называется формоизменяющая операция, в процессе которой плоская или полая заготовка превращается в полое изделие любой формы без принудительного утонения стенки. При вытяжке заготовка протягивается пуансоном через отверстие матрицы, в результате чего периметр заготовки уменьшается. При первой вытяжке (свертке) плоская заготовка превращается в полое изделие или полуфабрикат; при последующих вытяжках поперечные размеры полого полуфабриката уменьшаются при одновременном увеличении его высотных размеров (рис. 3.1).

Вытяжка без утонения стенок осуществляется при значительном уменьшении поперечных размеров и незначительном естественном изменении толщины стенки, которым пренебрегают. Кроме этого на-



блюдается незначительное изменение площади поверхности полуфабриката. Вытяжка с утонением стенок характеризуется принудительным уменьшением толщины стенки заготовки.

По форме и технологическим особенностям полые детали, получаемые вытяжкой, делят на три группы: 1) детали, имеющие форму тела вращения (осесимметричные); 2) детали коробчатой формы; 3) детали сложной формы (например, корпусные детали автомобилей). Детали после вытяжки могут быть с фланцем или без него, с плоским или фасонным дном (рис. 3.2, а–в).

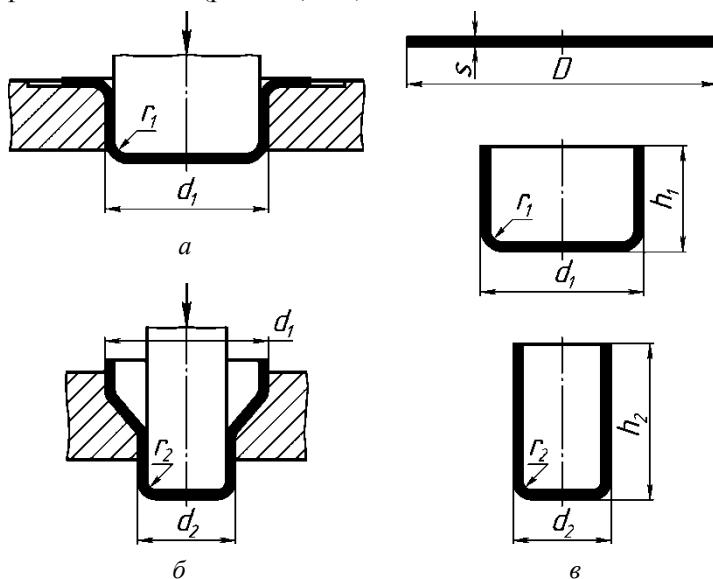


Рис. 3.1. Вытяжка без утонения: а – первая (свертка); б – последующие; в – межоперационные эскизы

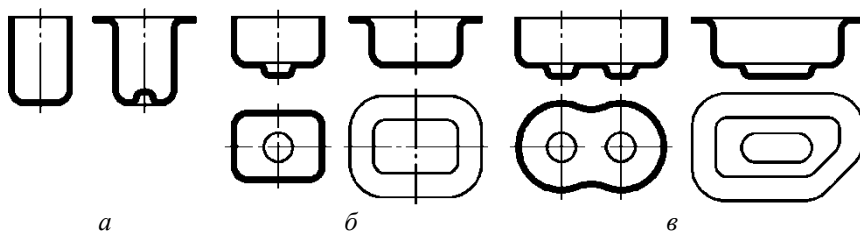


Рис. 3.2. Формы изделий, получаемых вытяжкой без утонения: а – тела вращения; б – коробчатой формы; в – сложной формы



Классификация способов вытяжки, применяемых в производстве, приведена на рис. 3.3.

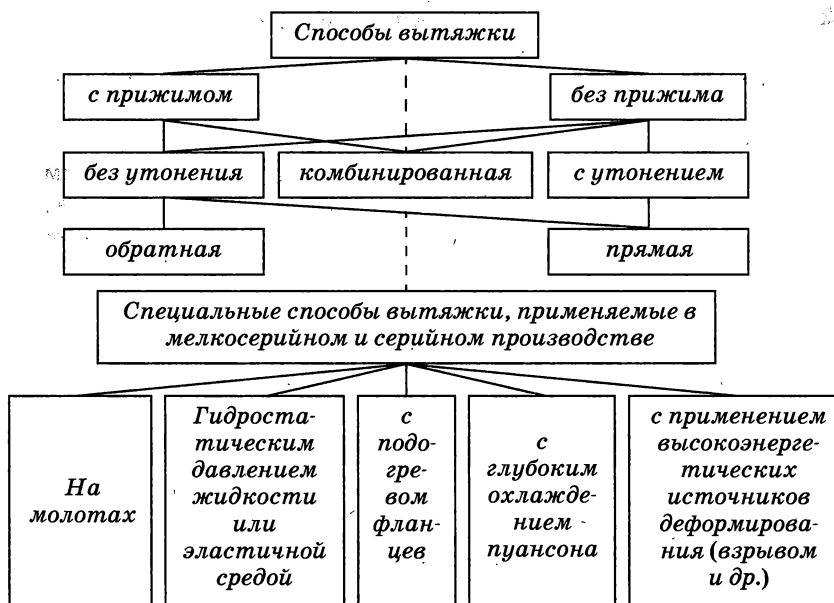


Рис. 3.3. Классификация способов вытяжки

В зависимости от формы детали заготовка может подвергаться либо вытяжке в чистом виде, либо вытяжке в сочетании с формовкой, гибкой, обжимом или отбортовкой.

Вытяжку осуществляют в вытяжных штампах на кривошипных прессах простого, двойного и тройного действия, а также на гидропрессах простого и двойного действия.

3.1.1. Вытяжка цилиндрических деталей

В процессе первой вытяжки кольцевая часть заготовки ($D-d$) (рис. 3.4, *a*) превращается в цилиндр диаметром d и высотой h . Следовательно, вытяжка происходит за счет пластической деформации, сопровождаемой смещением значительного объема металла в высоту.



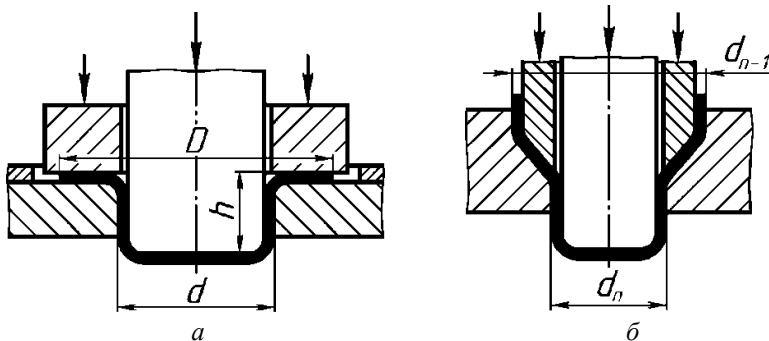


Рис. 3.4. Вытяжка без утонения с прижимом: *a* – первая (свертка); *б* – последующие

Вследствие анизотропии механических свойств металла заготовки в процессе вытяжки получают волнистую торцовую поверхность. Выпуклые участки называют фесто́нами, высота которых может достигать 20% от высоты вытянутой детали (рис. 3.5). Фестоны располагаются на участках кромки детали симметрично относительно направления прокатки.

При большой степени деформации, т.е. при глубокой вытяжке, и небольшой толщине материала избыточный смещенный объем является причиной образования гофров (складок) на деформируемой заготовке. При малой степени деформации и относительно большой толщине материала гофрообразование происходит, так как смещенный объем металла невелик.

Образование складок обусловлено напряженно-деформированным состоянием металла, приводящим при определенных геометрических соотношениях к потере устойчивости заготовки (рис. 3.6). В окружном направлении действуют сжимающие напряжения, приводящие к образованию складок.

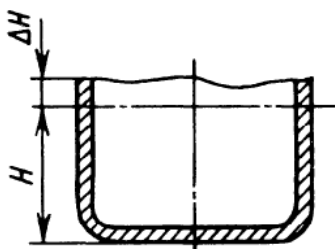


Рис. 3.5. Образование фестонов

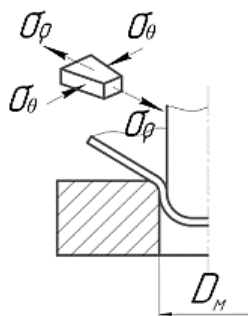


Рис. 3.6. Схема напряжений в начальный момент вытяжки без прижима



Для предотвращения образования гофров при вытяжке применяется прижим заготовки прижимным кольцом (складкодержателем), который прижимает фланец заготовки к матрице таким образом, что материал не может образовывать складки, а вынужден перемещаться в радиальном направлении. Прижим материала применяется как для первой вытяжки (см. рис. 3.4, *a*), так и на последующих переходах (рис. 3.4, *б*). Вытяжка без прижима применяется при изготовлении неглубоких изделий из толстых материалов.

Основным критерием, определяющим необходимость прижима при вытяжке, является относительная толщина S/D для первой и S/d_{n-1} для последующих операций (d_{n-1} – диаметр изделия на предыдущей операции). Необходимость использования прижима в зависимости от относительной толщины определяется условиями, представленными в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

Условия выполнения вытяжки с прижимом и без него

Операция вытяжки	С прижимом	С прижимом или без прижима	Без прижима
Первая	$D - d_1 > 22s$	$D - d_1 > (18 \dots 22)s$	$D - d_1 < 18s$
Последующие	$\frac{100s}{d_{n-1}} < 1,25$	$\frac{100s}{d_{n-1}} = 1,25 \dots 1,5$	$\frac{100s}{d_{n-1}} > 1,5$

В промежутках $D - d_1 = (18 \dots 22)s$ и $100s/d_{n-1} = 1,25 \dots 1,5$ вероятность образования гофров неопределенна и может зависеть от свойств металла заготовки.

Необходимость применения прижима для первой вытяжки в радиальной матрице (см. рис. 3.1, *a*) можно определить, используя формулу

$$\frac{S_0}{d_1} \leq \frac{1 - 1,09m}{1,07 \left(5,5 + \frac{R_M}{S_0} \right)},$$

где m – коэффициент вытяжки, $m = d_1/D$; R_M – радиус закругления матрицы. Если это условие выполняется, то необходимо использовать прижим.

Чтобы не использовать прижим на первой операции, применяют матрицы с конусной (рис. 3.7, *a*) и двухконусной (рис. 3.7, *б*) деформирующей частью.



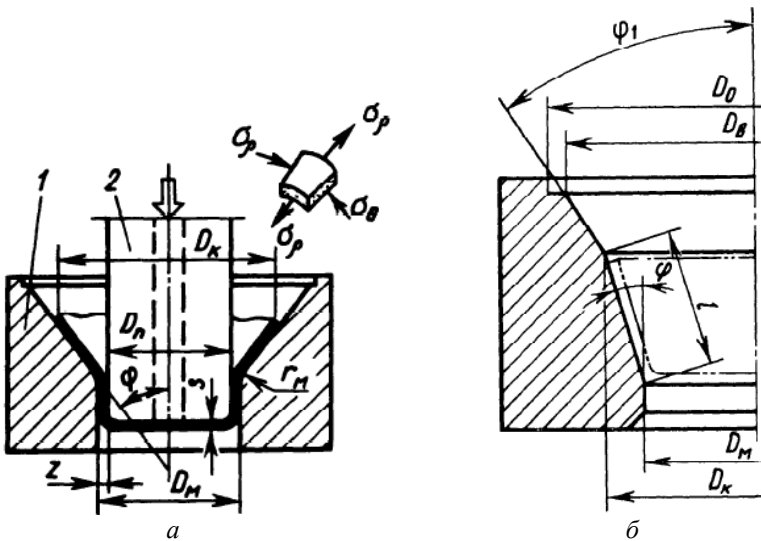


Рис. 3.7. Первая вытяжка в конусной (а) и двухконусной (б) матрицах

Напряженно-деформированное состояние заготовки. В случае первой вытяжки осесимметричных изделий без прижима и без утонения материала можно принять схему НДС, приведенную на рис. 3.8, с прижимом и без утонения материала – на рис. 3.9.

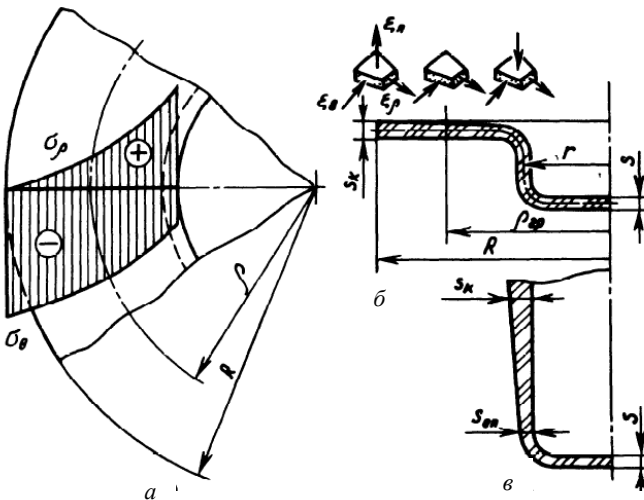


Рис. 3.8. Схема напряженно-деформированного состояния при вытяжке без прижима



Дно частично образованного полого цилиндра (элемент *a*) находится в плосконапряженном и объемно-деформированном состоянии. Двустороннее равномерное растяжение в плоскости дна и осевое сжатие составляют на первой операции всего 1...3 %, и ими пренебрегают. При многооперационной вытяжке уже после второй-третьей операции толщина дна заметно уменьшается, особенно у заготовок из латуни.

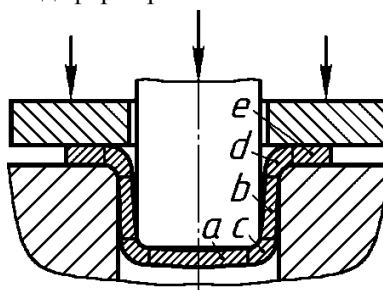


Рис. 3.9. Элементы заготовки с различным НДС при вытяжке без утонения с прижимом

Цилиндрическая часть, расположенная в зазоре между пуансоном и матрицей (элемент *b*), находится в линейно-напряженном и объемно-деформированном состоянии.

Непосредственно у донного закругления заготовки (элемент *c*) в металле возникают напряжения двухосного растяжения и одноосного сжатия, приводящие к значительному растяжению и утонению стенок. Вследствие этого поперечное сечение тела здесь является наименее прочным и наиболее опасным: возможен отрыв дна от стенок изделия.

Часть заготовки, находящаяся на закруглении рабочих кромок матрицы (элемент *d*), испытывает сложную деформацию, вызванную одновременным изгибом и распрямлением заготовки.

Кольцевая часть заготовки, расположенная под складкодержателем, находится в объемно-напряженном и объемно-деформированном состоянии (элемент *e*).

Из-за разноименной схемы НДС в участках заготовки толщина стенок будет различна по всему продольному сечению. Наибольшее утонение (10...18 %) происходит в месте перехода вертикальной стенки в дно колпака (рис. 3.10). В некоторых случаях (например, при отрыве дна) утонение достигает 30 % и более. По мере приближения к верхней кромке толщина материала непрерывно увеличивается, достигая максимальной величины на краях полого изделия. Это утолщение обычно составляет 15...25 % от начальной толщины и может иногда достигать 30 % и более.

Максимальное значение толщины края заготовки $s_{кр}$ приблизительно определяют из следующих зависимостей: для деталей без фланца $s_{кр} = s\sqrt{D/d_1}$; для деталей с фланцем диаметром $D_{фл}$: $s_{кр} = s\sqrt{D/D_{фл}}$.



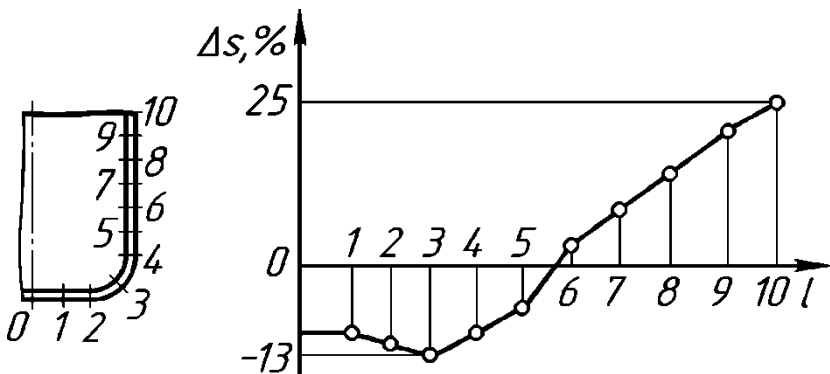


Рис. 3.10. Характер утонения стенки заготовки при вытяжке

При определении числа операций вытяжки нужно стремиться к тому, чтобы на всех операциях, начиная с первой, происходило такое уменьшение поперечного размера изделия, при котором напряжение в материале при полном использовании его пластических свойств не превосходило предел прочности. Это значит, что на каждой операции следует принимать максимально возможную степень деформации. Степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без утонения стенок чаще всего выражается коэффициентом вытяжки m или его обратной величиной – степенью вытяжки K . Эти показатели находятся в однозначной зависимости между собой и дают правильную характеристику общей степени деформации лишь при условии полной перетяжки фланца в боковую цилиндрическую поверхность детали.

Для первой операции значения коэффициента вытяжки m_1 и степени вытяжки K_1 определяются так: $m_1 = d_1/D$; $K_1 = 1/m_1 = D/d_1$. В табл. 3.2 представлена предельная степень деформации при первой вытяжке цилиндрических деталей. Для последующих операций вытяжки коэффициенты и степени вытяжки соответственно равны:

$$m_n = d_n/d_{n-1} = d_n/m_1 m_2 \dots m_{n-1} D;$$

$$K_n = d_{n-1}/d_n = D/K_1 K_2 \dots K_{n-1} d_n'$$

где d_n – диаметр детали после n -й операции.



Т а б л и ц а 3.2

Предельная степень деформации при первой вытяжке

Показатель степени деформации	Степень деформации	
	теоретическая	практическая
$m_{пр1}$	0,368	0,45
$K_{пр1}$	2,72	2,25
$\ln D/d_1$	1,0	0,8

Коэффициенты вытяжки должны быть разными для деталей различной геометрической формы (прежде всего для цилиндрических деталей с фланцем и без фланца), а также для различной относительной толщины материала, от которой зависит бóльшая или меньшая степень устойчивости фланца заготовки.

При вытяжке деталей с фланцем коэффициент первой вытяжки зависит также от относительного диаметра фланца D_f/d . Кроме того, предельный коэффициент вытяжки зависит от радиусов закругления кромок матрицы и пуансона, от зазора между пуансоном и матрицей, от качества материала, скорости вытяжки, числа и порядкового номера операций.

В табл. 3.3 приведены проверенные многолетней практикой оптимальные значения коэффициентов вытяжки цилиндрических деталей без фланца с прижимом в зависимости от относительной толщины заготовки для стали глубокой вытяжки (08, 08Г, 15Г), мягкой латуни и аналогичных им сплавов.

Т а б л и ц а 3.3

Коэффициенты вытяжки m_i для цилиндрических деталей без фланца

m_i	$(s/D)100, \%$				
	2,0...1,5	1,5...1,0	1,0...0,5	0,5...0,2	0,2...0,06
m_1	0,46...0,50	0,50...0,53	0,53...0,56	0,56...0,58	0,58...0,60
m_2	0,70...0,72	0,72...0,74	0,74...0,76	0,76...0,78	0,78...0,80
m_3	0,72...0,74	0,74...0,76	0,76...0,78	0,78...0,80	0,80...0,82
m_4	0,74...0,76	0,76...0,78	0,78...0,80	0,80...0,82	0,82...0,84

Меньшие значения m_i соответствуют бóльшим значениям показателя анизотропии и большему радиусу закругления кромки матрицы на первой операции ($r_m = (8...10)s$), бóльшие значения – меньшей величине показателя анизотропии и меньшему радиусу ($r_m = (4...6)s$).



При вытяжке менее пластичных материалов (стали 20, 25, Ст2, Ст3, наклепанные алюминий и латунь) коэффициенты вытяжки следует устанавливать на 1,5...2 % больше, а для более пластичных материалов (стали 05, 08 кп, алюминий) – на 1,5...2 % меньше по сравнению со значениями, приведенными в табл. 3.3. В случае применения межоперационного отжига коэффициенты вытяжки на последующих операциях могут быть уменьшены на 3...5 %.

После установления коэффициентов вытяжки по переходам определяют соответствующие диаметры цилиндрических изделий: $d_n = k_n d_{n-1}$, а также число операций вытяжки.

Как показала практика, коэффициенты вытяжки на последующих операциях, начиная со второй, в случае применения межоперационных отжигов могут быть взяты при приближенном расчете одинаковыми: $m_1 = m_2 = \dots = m_n$. С учетом этого число операций при вытяжке цилиндрических деталей без утонения:

$$n \approx 1 + \frac{\ln(d_n/m_1 D)}{\ln m_2}.$$

При технологических расчетах процессов вытяжки зачастую требуемые размеры изделия не совпадают с рассчитанными по коэффициентам, взятым из табл. 3.2. В этом случае необходимо определить общий коэффициент вытяжки $m = d_n/D$, а коэффициенты по операциям откорректировать в сторону увеличения с учетом равенства $m = m_1 \times m_2 \times \dots \times m_n$.

Высота цилиндрического изделия после n -й вытяжки:

$$h_n = 0,25((D/(m_1 \dots m_n)) - d_n) + 0,43(r_n/d_n)(d_n + 0,32r_n),$$

где r_n – радиус закругления у дна после n -й вытяжки.

Для тонких материалов ($s < (1,5 \dots 2)$ мм) диаметр d_i изделия и полуфабрикатов принимают обычно по наружному диаметру; для более толстых материалов – по среднему диаметру.

Расчет заготовки для вытяжки. Расчет размеров заготовки проводят из условия равенства объемов детали и заготовки, однако в связи с тем, что толщина заготовки при вытяжке меняется незначительно, а кроме того и неодинаково (в одних зонах она увеличивается, а в других уменьшается), можно вместо равенства объемов использовать равенство площадей поверхности детали и заготовки: $F_{дет} = F_{заг}$. Если деталь имеет форму тела вращения, то заготовка – форму круга, поэтому для вытяжки цилиндрических изделий получим



$$F_{\text{дет}} = \frac{\pi D_3^2}{4} = 0,785 D_3^2,$$

откуда можно определить диаметр исходной заготовки:

$$D_3 = 1,13\sqrt{F_3}.$$

Поверхность детали разбивают на элементарные поверхности (рис. 3.11). Тогда диаметр заготовки:

$$D_3 = 1,13\sqrt{f_1 + f_2 + \dots + f_n}.$$

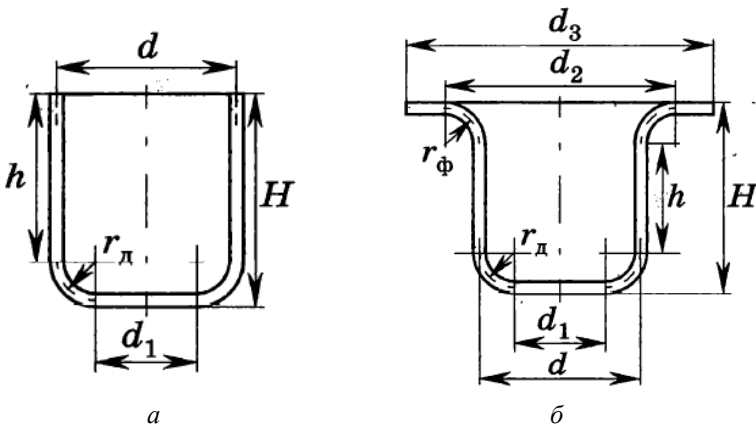


Рис. 3.11. Схемы расчета размеров заготовки для вытяжки:
а – без фланца; б – с фланцем

Тогда для вытяжки цилиндрических изделий без фланца (рис. 3.11, а) получим

$$\frac{\pi D_3^2}{4} = \frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d(h + \Delta h) + \frac{\pi}{4} (2\pi d_1 r + 8r^2),$$

откуда

$$D_3 = \sqrt{d_1^2 + 2\pi r d_1 + 8r^2 + 4d(h + \Delta h)},$$

где Δh – величина припуска на обрезку заготовок, который назначают в связи с тем, что вытянутые детали вследствие анизотропии листа и неодинаковых условий трения имеют неровную, волнистую верхнюю кромку вытянутой части. Этот припуск назначают в зависимости от



относительной высоты получаемой детали и ее толщины (он составляет обычно 5...15% от высоты детали).

При вытяжке цилиндрических изделий с фланцем (рис. 3.11, б)

$$\frac{\pi D_3^2}{4} = \frac{\pi}{4} [(d_3 + 2\Delta h)^2 - d_2^2] + \frac{\pi}{4} (2\pi r d_2 - 8r^2) + \pi d h + \frac{\pi}{4} (2\pi d_1 r + 8r^2) + \frac{\pi d_1^2}{4}.$$

$$D_3 = \sqrt{d_1^2 + 4dh + 2\pi r(d_1 + d) + \pi r^2 + (d_3 + 2\Delta h)^2 - d_2^2}.$$

В справочниках (например, [13]) приведены формулы для определения диаметра заготовки при вытяжке наиболее часто применяемых форм осесимметричных деталей.

Графоаналитический метод применяется для определения диаметра заготовки для деталей со сложной криволинейной образующей. При этом используют правило Гульдена–Паппа, согласно которому поверхность тела, образованного кривой произвольной формы путем вращения этой кривой вокруг оси, находящейся в плоскости кривой, равна произведению длины образующей на длину окружности, проходящей через центр тяжести образующей, т.е.

$$F = L2\pi R_{ц.т.},$$

тогда, зная площадь поверхности изделия, можно определить диаметр исходной заготовки:

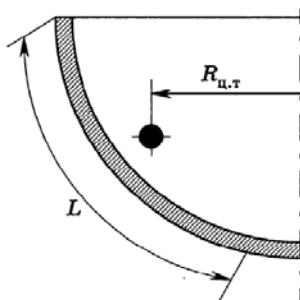


Рис. 3.12. Схема к определению размеров заготовки графоаналитическим методом

$$D_3 = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = 2\sqrt{2LR_{ц.т.}},$$

где $R_{ц.т.}$ – расстояние от оси детали до центра тяжести образующей (рис. 3.12).

В современных автоматизированных графических системах имеются функции определения площадей поверхностей твердых тел сложной формы.

Расчетные диаметры заготовок для деталей сложной формы обычно проверяют путем проведения экспериментов и только после этого устанавливают окончательные размеры заготовки для изготовления штампа для их вырубки.



При определении окончательных размеров исходной заготовки необходимо пользоваться следующими правилами:

1) припуски на обрезку края Δh определяют по справочным таблицам в зависимости от вида детали (с фланцем или без фланца), высоты детали h и относительной высоты h/d (где d – диаметр детали);

2) при высоте вытягиваемой детали $h < 0,5d$ и толщине стенок $s < 1$ мм можно пользоваться при расчетах чертежными размерами (внутренними или наружными);

3) если высота детали $h > 0,5d$, а толщина стенок $s < 1$ мм, или независимо от отношения h/d , но при $s > 1$ мм, за линию расчетного контура следует принимать среднюю линию детали;

4) если толщина детали $s > 2$ мм, то при относительных радиусах на детали r_d , меньших $(0,2 \dots 0,3)s$, ими можно пренебречь;

5) если на чертеже детали указаны допуски на ее размеры, то расчет необходимо проводить по номинальным размерам с учетом этих допусков.

Зазоры при вытяжке без утонения. При обычной вытяжке деталей больших и средних размеров для уменьшения трения между матрицей и материалом применяется зазор между пуансоном и матрицей (рис. 3.13). При определении величины зазора учитывают утолщение края заготовки при вытяжке и неравномерность толщины материала (допуск по толщине).

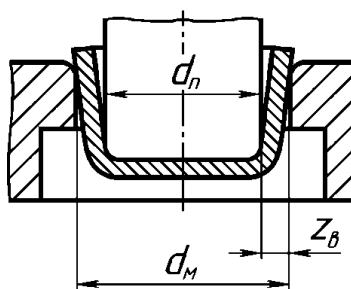


Рис. 3.13. Зазоры при вытяжке без утонения

Величина зазора, так же как и радиус закругления, влияет на основные элементы вытяжки: силу и затрачиваемую работу, качество изделий и стойкость штампа. При малых зазорах процесс деформации усложняется увеличением сил трения, а следовательно, и увеличением силы вытяжки и износа штампа. При больших зазорах возникает опасность появления складок, которые ухудшают качество изделий и увеличивают износ инструмента.

Согласно экспериментальным данным некоторых исследователей, для получения качественной поверхности вытянутого изделия зазор должен превышать толщину материала на 30...38 %, т.е. $z_B = (1,30 \dots 1,38)s$.

На основании опытных данных различных заводов и исследователей величины односторонних зазоров при вытяжке z_B из мягкой



стали для первой операции составляют $(1,35 \dots 1,50)s$, для последующих $(1,20 \dots 1,30)s$; при вытяжке из алюминия и латуни соответственно $(1,30 \dots 1,40)s$ для первой операции и $(1,20 \dots 1,25)s$ для последующих операций. Калибровочная (последняя) операция осуществляется при зазорах $z_b = (1,30 \dots 1,38)s$. В некоторых случаях с целью получения гладкой поверхности при вытяжке деталей из цветных металлов, наоборот, на первой операции уменьшают зазор, а на последующих увеличивают.

При вытяжке прямоугольных изделий односторонний зазор между пуансоном и матрицей в углах должен быть на $(0,05 \dots 0,07)s$ больше зазора на прямых участках, так как при вытяжке в углах получается утолщение материала.

Для всех операций, кроме последней, направление зазора может быть любым, т.е. его можно задавать как за счет матрицы, так и за счет пуансона. Для последней операции, когда требуется получить окончательные размеры изделия, зазор задается за счет пуансона, если необходимо обеспечить наружный размер, и за счет матрицы – если внутренних.

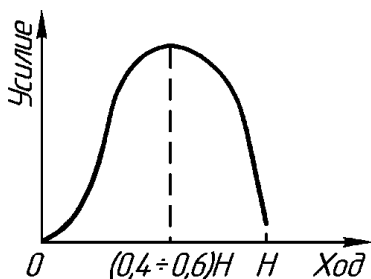


Рис. 3.14. Характер изменения силы при вытяжке без утонения

Сила и работа вытяжки без утонения. Сила вытяжки изменяется на протяжении рабочего хода пуансона, достигая максимума при глубине $h = (0,4 \dots 0,6)H$, где H – полная глубина вытяжки. Типовой график изменения силы вытяжки представлен на рис. 3.14.

Максимальная сила вытяжки цилиндрической:

$$P_{\max} = \sigma_p F,$$

где σ_p – величина максимальных меридиональных напряжений, определяемая для первой вытяжки по формуле

$$\sigma_p = 1,1\sigma_i \left[\ln \frac{1}{m} + \frac{2\sigma_b \mu_M}{1,1\sigma_i} + \frac{S_0}{4(r_M + 0,5S_0)} \right] e^{\mu_M \varphi},$$

где σ_i – интенсивность напряжений:



$$\sigma_i = \sigma_B \left(\frac{1-m}{\psi_y} \right)^{\frac{\psi_y}{1-\psi_y}} ;$$

σ_B – временное сопротивление (предел прочности) материала заготовки; ψ_y – относительное равномерное сужение при испытании образцов на растяжение (от ψ_y легко перейти к ε_{iy} , так как между ними существует функциональная связь: $\varepsilon_{iy} = \ln \frac{1}{1-\psi_y}$); μ_m – коэффициент трения по матрице; φ – угол охвата кромки матрицы заготовкой в зоне очага деформации, $\varphi = \pi/2$ для вытяжки без утонения в радиальных матрицах; F – площадь поперечного сечения заготовки в месте сопряжения стенки с дном:

$$F = \frac{\pi}{4} (d_m^2 - (d_m - 2S_0)^2).$$

Величина максимальных меридиональных напряжений для второй и последующих вытяжек:

$$\sigma_p = 1,1\sigma_i \left[(1 + \mu_m \operatorname{ctg} \alpha) \ln \frac{1}{m} + 0,66 \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{S_{n-1}}{d_{n-1}}} \right],$$

где $\alpha = \alpha_m$ – угол конусности матрицы; S_{n-1}, d_{n-1} – толщина стенки и диаметр исходной цилиндрической заготовки; m – коэффициент вытяжки, равный d_n/d_{n-1} .

В практических расчетах наибольшее применение нашли инженерные формулы для определения силы вытяжки, исходящие из того, что допустимые напряжения в опасном сечении должны быть меньше разрушающих, а, следовательно, наибольшая сила предельно возможной вытяжки должна быть несколько меньше силы, соответствующей отрыву дна в опасном сечении.

Фактическая величина напряжений в опасном сечении, как и сила вытяжки, зависит от сопротивления металла деформированию, степени деформации или коэффициента вытяжки, относительной толщины заготовки, относительного радиуса закругления пуансона и матрицы, а также от показателя анизотропии.

В табл. 3.4 приведены инженерные формулы для расчета силы вытяжки P_B при получении деталей различной геометрической формы с учетом пропорциональности разрушающих напряжений пределу



прочности $\sigma_\rho = K\sigma_B$. Здесь d_k – меньший диаметр конической детали или половина диаметра сферы; $d_{cрn}$ – средний диаметр овальной детали после n -й вытяжки; K , K_ϕ , K_n и K_B – коэффициенты пропорциональности, зависящие от тех же факторов, что и коэффициенты вытяжки.

Т а б л и ц а 3.4

Формулы для определения силы вытяжки

Типы вытягиваемых деталей	Операции вытяжки	Формулы
Цилиндрические без фланца	Любая	$P_B = K\pi d_n s \sigma_B$
Цилиндрические с широким фланцем	Первая	$P_B = K_\phi \pi d_1 s \sigma_B$
Конические и сферические с фланцем	Первая	$P_B = K_\phi \pi d_k s \sigma_B$
Овальные коробки	Любая	$P_B = K\pi d_{cрn} s \sigma_B$
Низкие прямоугольные коробки (вытяжка в одну операцию)	–	$P_B = 2K_n s \sigma_B (A + B - 0,86r)$
Высокие квадратные коробки (многооперационная вытяжка)	Первая и вторая	$P_B = K\pi d_n s \sigma_B$
	Последняя	$P_B = K_B s \sigma_B (4B - 1,72r)$
Высокие прямоугольные коробки (многооперационная вытяжка)	Первая и вторая	$P_B = K\pi d_{cрn} s \sigma_B$
	Последняя	$P_B = 2K_B s \sigma_B (A + B - 0,86r)$

Расчетная сила прижима P_Π для вытяжки деталей любой формы (в общем виде):

$$P_\Pi = Fq,$$

где F – площадь заготовки под прижимом; q – давление прижима. Для первой вытяжки цилиндрических деталей из плоской заготовки:

$$P_\Pi = 0,25\pi[D^2 - (d_1 + 2r_M)^2]q.$$

Для последующих вытяжек цилиндрических деталей из полых заготовок:

$$P_\Pi = 0,25\pi[d_{n-1}^2 - (d_n + 2r_M)^2]q.$$



Сила прижима на второй операции вытяжки, как правило, в шесть раз меньше, чем на первой.

На практике давление, необходимое для прижима, устанавливается по отсутствию складкообразования и разрывов материала. Среднее давление прижима для мягкой стали при $s < 0,5$ мм приближенно может быть принято $q = 2 \dots 3$ МПа, при $s > 0,5$ мм $q = 1,5 \dots 2,5$ МПа; для латуни $q = 1 \dots 2$ МПа. Более точная зависимость для мягкой стали при первой вытяжке определяется по формуле

$$q = 2 \cdot 10^3 \frac{D}{s} \left(\frac{D}{d_1} - 1,2 \right), \text{ МПа.}$$

Полная сила вытяжки P определяется суммой составляющих P_B и P_{Π} :

$$P = P_B + P_{\Pi}.$$

Действительная работа вытяжки A_B равна площади, ограниченной кривой силы на протяжении рабочего хода инструмента. Для ее определения следует исходить не из максимальной силы вытяжки P_B , а из средней величины $P_{cp} = cP_B$. Тогда работа вытяжки:

$$A_B = cP_B h.$$

По опытным данным, принимают для первой операции при $m_1 = 0,55 \dots 0,80$ $c = 0,64 \dots 0,80$ и для последующих при $m_n = 0,70 \dots 0,90$ $c = 0,70 \dots 0,85$.

3.1.2. Вытяжка цилиндрических деталей с фланцем

Вытяжку глубоких цилиндрических деталей с небольшим фланцем $D_{\phi}/d = 1,1 \dots 1,4$ при $h/d > 1$ производят таким же способом, что и вытяжку без фланцев, т.е. путем полной перетяжки фланца в цилиндрическую поверхность изделия. При этом могут быть использованы те же значения коэффициентов вытяжки, что и для деталей без фланца. Фланец в этом случае образуется под прижимным кольцом штампа только на последней операции (рис. 3.15), затем отгибается, калибруется и обрезается по заданному размеру.

Вытяжку глубоких цилиндрических деталей с большим (широким) фланцем осуществляют таким образом, что требуемый по размеру фланец образуется уже при первой вытяжке из плоской заготовки. При этом на первой операции в матрицу должно быть втянуто столь-



ко металла, сколько требуется для образования окончательно вытянутой части изделия и металла, обратно возвращенного на плоскость фланца. На последующих операциях размер фланца увеличивается в сторону оси изделия, а цилиндрическая часть уменьшается в диаметре и увеличивается по высоте (рис. 3.16).

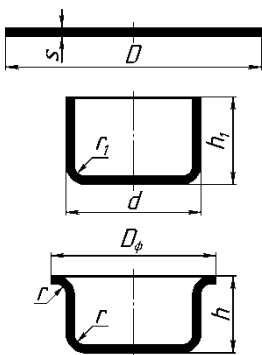


Рис. 3.15. Переходы при вытяжке деталей с узким фланцем

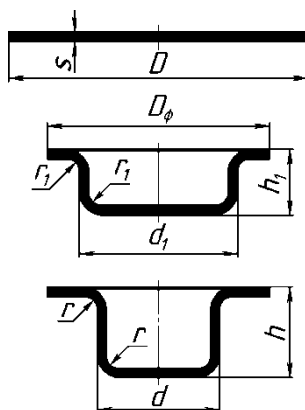


Рис. 3.16. Переходы при вытяжке деталей с широким фланцем

Общую степень деформации K_Φ и коэффициент вытяжки m_Φ можно определить по зависимости

$$K_\Phi = \frac{1}{m_\Phi} = \sqrt{\left(\frac{D_\Phi}{d}\right)^2 + 4\frac{h}{d} - 3,44\frac{r}{d}},$$

где D_Φ/d – относительный диаметр фланца; h/d – относительная глубина вытяжки; r/d – относительный радиус закругления у дна и у фланца.

Очевидно, что на общую величину деформации наибольшее влияние оказывает относительный диаметр фланца D_Φ/d .

3.1.3. Реверсивная вытяжка

Реверсивная вытяжка (с выворачиванием, обратная) представляет собой последующую вытяжку детали из полого изделия с обратным направлением (рис. 3.17). Полая заготовка устанавливается дном



кверху на матрицу и пуансоном вытягивается со стороны дна внутрь (выворачивается). При таком способе вытяжки материал получает дополнительное натяжение, что способствует получению гладких изделий без складок.

Этот способ применяется главным образом для вытяжки деталей крупных или средних размеров при относительной толщине заготовки $(s/D)100 > 0,25$.

В большинстве случаев реверсивную вытяжку совмещают с обычной, выполняя обе операции за один рабочий ход пресса. При этом можно получить более высокую степень деформации. Пример такой вытяжки с выворачиванием на прессе двойного действия показан на рис. 3.18. Вначале верхний пуансон-матрица осуществляет свертку цилиндрического стакана из плоской заготовки (рис. 3.18, *а*). Далее нижний пуансон выворачивает стакан с уменьшением его диаметра (рис. 3.18, *б*). Выворачивание осуществляется с прижимом, работа которого начинается с момента окончания свертки.

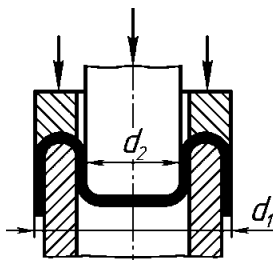


Рис. 3.17. Реверсивная вытяжка

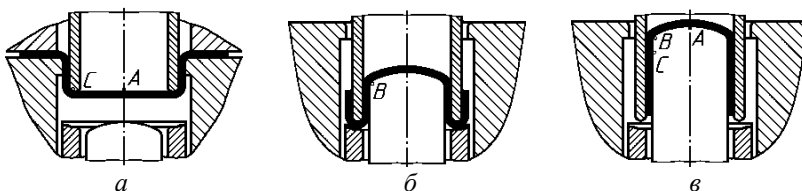


Рис. 3.18. Стадии реверсивной вытяжки со сверткой:
а – свертка; *б* – выворачивание *в* – получение готового изделия

Уменьшение толщины стенки полого изделия после такого способа вытяжки достигает в опасных сечениях (точки *A*, *B* и *C*) 10 %, а утолщение у края детали – 30 % (рис. 3.18, *в*).

Реверсивную вытяжку деталей средних размеров иногда производят одновременно с вырубкой заготовки. Для этого в конструкцию штампа вводится вырубная матрица. Реверсивная вытяжка применяется также и для изготовления двустенных полых деталей.

Для осуществления вытяжки с выворачиванием требуется пресс с большой величиной хода (как правило, гидравлический).



3.1.4. Вытяжка деталей ступенчатой формы

Из-за большого разнообразия и сложности форм деталей ступенчатой формы нет единой методики проектирования технологических переходов вытяжки таких изделий.

Прежде всего необходимо установить, можно ли ступенчатую деталь вытянуть за одну операцию или требуется несколько переходов. Приблизненно число операций можно определить по условному коэффициенту вытяжки $m_{ст}$:

$$m_{ст} = \frac{\frac{h_1}{h_2} \frac{d_1}{D} + \dots + \frac{h_{n-1}}{h_n} \frac{d_{n-1}}{D} + \frac{d_n}{D}}{\frac{h_1}{h_2} + \dots + \frac{h_{n-1}}{h_n} + 1},$$

где неизвестные величины соответствуют рис. 3.19.

Если условный коэффициент вытяжки $m_{ст}$ равен или больше допустимого коэффициента вытяжки полой цилиндрической заготовки

$m_{пр1}$, то деталь можно отштамповать за одну операцию. В противном случае вытяжку ступенчатой детали следует осуществлять за несколько операций, постепенно увеличивая коэффициенты вытяжки по ступеням, установленные как для цилиндрических деталей. Количество вытяжек определяется числом ступеней, если при этом коэффициенты вытяжки на каждой ступени не ниже допустимых.

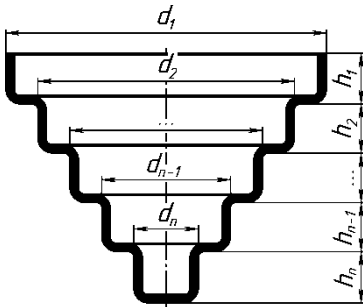


Рис. 3.19. Эскиз детали после ступенчатой вытяжки

Проектируя технологический процесс вытяжки ступенчатых деталей, необходимо учитывать, что за каждую операцию в матрицу должно втягиваться столько металла заготовки, сколько требуется его для дальнейшей деформации на последующей операции. Однако на практике лучше иметь небольшой избыток материала по сравнению с установленным расчетом на 3...5 %, так как при недостатке втянутого в матрицу металла возможны обрывы.

При вытяжке ступенчатых деталей с широким фланцем должны быть соблюдены правила, относящиеся к вытяжке цилиндрических изделий с широким фланцем.



3.1.5. Вытяжка деталей сферической, параболической и криволинейной форм

Вытяжка деталей подобной конфигурации протекает в более трудных условиях, чем вытяжка цилиндрических изделий, так как в начале операции между матрицей и пуансоном существует очень большой зазор и большая часть материала фланца не имеет контакта со штампом. Это приводит к образованию складок и выпучиванию стенок изделия. Для предохранения вытягиваемых изделий от гофрообразования используют искусственное увеличение радиальных растягивающих напряжений, которое можно достичь увеличением коэффициента трения на контактных поверхностях рабочего инструмента, созданием тормозных ребер (буртиков или порогов) или применением реверсивной вытяжки.

В зависимости от сложности формы детали, ее высоты и относительной толщины материала заготовки применяют те или иные способы вытяжки.

При вытяжке деталей сферической (полусферовой) формы коэффициент вытяжки постоянен и для любого диаметра равен $m_{сф} = 0,71$. Возможность вытяжки без брака определяется относительной толщиной заготовки s/D . Чем меньше ее значение, тем скорее возникают складки и тем труднее идет процесс вытяжки. При $(s/D)100 > 3$ вытяжка полусферы может быть произведена без прижима, формовкой в упор в глухом штампе. При $(s/D)100 = 0,5 \dots 3$ необходима вытяжка с прижимом или реверсивная вытяжка. При $(s/D)100 < 0,5$ используется матрица с вытяжными ребрами (рис. 3.20) или вытяжка с выворачиванием.

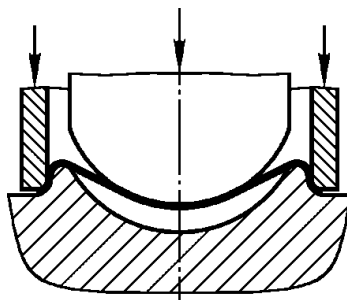


Рис. 3.20. Вытяжка сферических деталей в матрице с вытяжными ребрами

При изготовлении деталей из материала толщиной до $0,4 \dots 0,5$ мм, у которых не требуется высокая точность размеров, можно применять многослойную вытяжку (заготовки в два-три слоя). Помимо трехкратного увеличения производительности при таком способе улучшается качество изделий, так как многослойная заготовка обладает большей устойчивостью и изделия получаются без складок.



Для штамповки тонкостенных сферических деталей больших размеров вместо вытяжки в штампах с вытяжными ребрами используется вытяжка без прижима, но с двойным перегибом заготовки (рис. 3.21).

Не рекомендуется использовать способ изготовления сферических

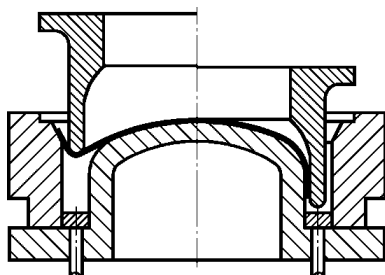


Рис. 3.21. Вытяжка сферических деталей с двойным перегибом

и параболических деталей путем вытяжки полуфабриката ступенчатой формы с последующей правкой плавного контура вследствие большого количества дефектов (неравномерность толщины, морщины, неразглаженные следы уступов и т.п.). В ряде случаев для устранения дефектов приходится прибегать к последующей калибровке.

Более качественные результаты при получении деталей параболической формы дает метод реверсивной вытяжки (например, при изготовлении корпусов автомобильных фар и т.п.).

3.1.6. Вытяжка конических деталей

Схема вытяжки конических изделий зависит от относительной высоты, конусности изделия, а также от относительной толщины материала.

В технологическом плане конические детали можно разделить на три типа:

1) низкие – небольшой относительной высоты $h/d = 0,1 \dots 0,3$ с широким конусом и пологой образующей, имеющей угол с вертикалью $50^\circ \dots 80^\circ$;

2) средние – с относительной высотой $h/d = 0,3 \dots 0,7$ средней конусности и с углом образующей в пределах $25^\circ \dots 45^\circ$;

3) высокие – большой относительной высоты $h/d > 0,7$ с узким конусом и крутой образующей, имеющей угол от 10° до 30° .

Вытяжка конических деталей, как и сферических, также затруднена тем, что давление пуансона передается лишь небольшой поверхности в центре заготовки, вызывая значительное местное утонение, а иногда и обрывы. Кроме того, значительная часть поверхности заготовки остается вне прижима и легче образует складки.



Вытяжка низких конических изделий обычно выполняется за одну операцию, но осложняется тем, что степень деформации невелика и после упругой разгрузки деталь теряет свою форму. Поэтому при вытяжке посредством вытяжных ребер или прижима создают в деформируемой заготовке значительные растягивающие напряжения, превышающие предел упругости материала. Угол пружинения после вытяжки для низкоуглеродистых сталей составляет $7' \dots 10'$.

Низкие детали без фланца из малоуглеродистой стали вытягивают за одну операцию без прижима заготовки, если коэффициент вытяжки $m_k = d_k/D$ имеет значения не менее приведенных ниже:

$(s/D)100$	1,2	1,35	1,5...1,7	1,85	2,0
m_k	0,7	0,62	0,6	0,55	0,5

Вытяжка низких конических деталей с фланцем при относительной толщине $(s/D)100 = 0,8 \dots 1,2$ также выполняется за одну операцию при тех же значениях m_k , но с прижимом.

Вытяжка конических изделий средней высоты в большинстве случаев производится за одну операцию. Лишь при малой относительной толщине заготовки, а также при наличии фланца требуется применить две-три операции вытяжки.

При штамповке конусных деталей из сравнительно толстого материала при $(s/D)100 > 2,5$ с небольшой разницей диаметров дна и верха вытяжка может осуществляться без прижима, аналогично вытяжке цилиндрических деталей. В конце рабочего хода необходима калибровка глухим ударом.

При изготовлении тонкостенных конических изделий со значительной разницей диаметров сначала вытягивают более простую округленную форму с площадью поверхности, как и у готовой детали, а затем в калибровочном штампе получают окончательную форму.

Вытяжку высоких конических деталей осуществляют в несколько переходов двумя основными способами: предварительной вытяжкой ступенчатой заготовки и последующей ее калибровкой (рис. 3.22, а) или постепенным вытягиванием конической заготовки из предварительно вытянутого цилиндрического стакана (рис. 3.22, б). Второй способ более предпочтителен.

Высокие конические детали с фланцем получают из предварительно вытянутой цилиндрической заготовки.



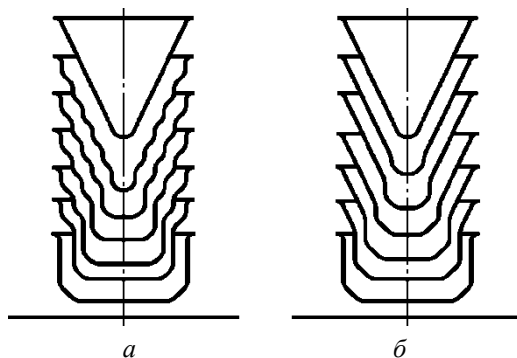


Рис. 3.22. Способы вытяжки конических деталей: *а* – вытяжки ступенчатой детали с последующей калибровкой; *б* – постепенным образованием конуса

3.1.7. Многооперационная последовательная вытяжка в ленте

Последовательной вытяжкой в ленте получают изделия небольших размеров в основном из таких материалов, как латунь, пластичные алюминиевые сплавы, стали для глубокой вытяжки. Используется этот способ в массовом производстве. Штамповка в ленте может быть осуществлена двумя способами:

- 1) вытяжкой в целой ленте с последующей вырубкой вытянутой детали на последнем переходе – позиции (рис. 3.23, *а*);
- 2) вытяжкой с предварительными надрезами или вырезами в ленте из отдельных соединяемых перемычками участков заготовки (рис. 3.23, *б*).

Кроме этого, последовательная штамповка в ленте может быть однорядной или многорядной.

Первый способ применяется при вытяжке деталей из относительно толстого и пластичного материала при малой величине фланца: $s > 0,05d$; $D_{\phi} \leq (1,1 \dots 1,2)d$. Второй способ используют для получения деталей из относительно тонкого материала, а также деталей с широким фланцем: $s < 0,05d$; $D_{\phi} > 1,2d$.

Первый вариант более экономичен по расходу материала, но применяется главным образом для многорядной вытяжки небольших цилиндрических деталей. Второй вариант дает больший расход материала, но более универсален и применим для вытяжки деталей цилиндрической, конической, прямоугольной и сложной форм.



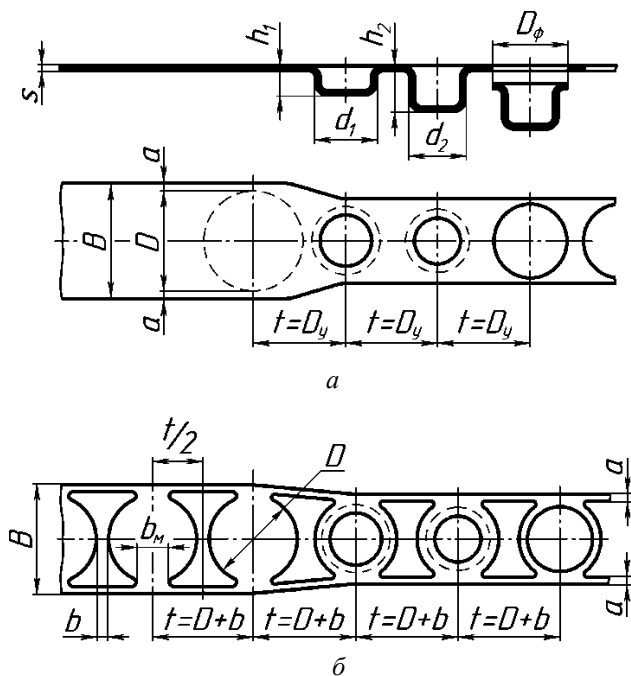


Рис. 3.23. Способы многооперационной последовательной вытяжки в ленте:
a – в целой ленте; *б* – с предварительными вырезами

Так как процесс вытяжки в ленте происходит так же, как и при вытяжке деталей с фланцем, без промежуточных отжигов, то в основном применимы те же методы расчета технологического процесса, как и для вытяжки цилиндрических деталей с фланцем без отжига.

Процесс вытяжки в целой ленте сопровождается некоторым растяжением металла и деформацией всей ленты, поэтому во избежание разрывов и трещин коэффициенты последовательной вытяжки в целой ленте берут больше, чем при обычной вытяжке.

3.2. Вытяжка с утонением стенки

Вытяжка с утонением применяется в случае необходимости получения высоких пустотелых изделий с толщиной дна, превышающей толщину стенки. Вытяжка с утонением осуществляется путем проталкивания пуансоном заготовки в виде колпачка через матрицу. При



этом зазор между пуансоном и матрицей z всегда меньше толщины стенки исходной заготовки S .

В процессе вытяжки с утонением стенки происходит требуемое увеличение высоты заготовки за счет уменьшения первоначальной толщины стенки при относительно небольшом изменении (уменьшении) наружного диаметра изделия.

Вытяжкой с утонением стенки получают детали и полуфабрикаты типа глубоких цилиндрических сосудов, снарядных гильз, гильз и пульных оболочек для патронов стрелкового оружия и других изделий из различных материалов: медных и алюминиевых сплавов, малоуглеродистой стали, нержавеющей стали и других сплавов, имеющих достаточно высокую пластичность в холодном состоянии.

В качестве заготовки для вытяжки с утонением применяют заготовки, полученные или вытяжкой без утонения или выдавливанием. В последнем случае заготовку для выдавливания получают отрезкой от прутка или вырубкой из листа.

На рис. 3.24 приведена схема вытяжки с утонением. В очаге пластической деформации, где происходит сжатие металла между пуансоном и матрицей, силы трения имеют различные направления. Силы трения, действующие на наружной поверхности заготовки, направлены противоположно движению пуансона. Вследствие деформации происходит удлинение заготовки, которая как бы скользит в направлении, противоположном движению пуансона, поэтому силы трения на внутреннюю поверхность заготовки действуют в направлении движения пуансона.

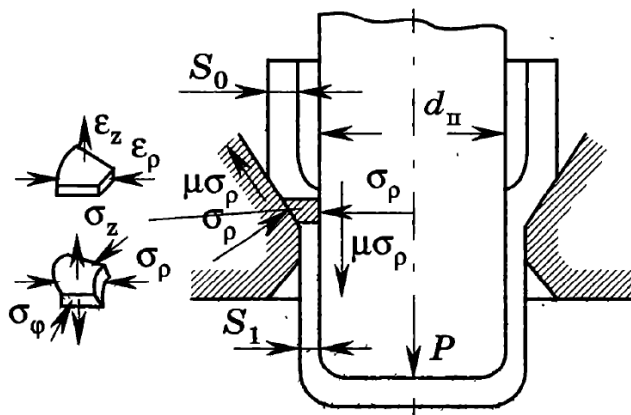


Рис. 3.24. Схема вытяжки с утонением



Таким образом, силы трения на наружной поверхности заготовки способствуют увеличению растягивающих напряжений, действующих в стенках продеформированной части заготовки, а силы трения на внутренней поверхности заготовки, наоборот, уменьшают эти растягивающие напряжения. Этим объясняется возможность получения больших приращений высоты стенки за один переход.

Вытяжка с утонением происходит в условиях объемного напряженного состояния (см. рис. 3.24) с двумя сжимающими и одним растягивающим напряжением и объемного деформированного состояния. Однако если принять во внимание, что деформация заготовки в тангенциальном направлении (относительное уменьшение диаметра) мала по сравнению с деформациями в осевом (увеличение высоты) и радиальном (уменьшение толщины стенки) направлениях, то можно принять условие плоского деформированного состояния с осевыми деформациями растяжения и радиальными деформациями сжатия.

Для определения наибольшего нормального растягивающего напряжения, действующего в осевом направлении, можно использовать формулу

$$\sigma_z = \sigma_i \left\{ \ln \frac{S_0}{S} + \frac{1}{4 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \left(1 - 0,5 \ln \frac{S_0}{S} \right) \left(\frac{S_0}{S} - 1 \right) \times \right. \\ \left. \times \left[\mu_m - \mu_n + \frac{S_0}{S} (\mu_m + \mu_n) \right] + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right\},$$

где S – толщина стенки после вытяжки; S_0 – толщина стенки исходной заготовки; α – угол наклона образующей матрицы; μ_m – коэффициент трения на поверхности контакта матрицы и заготовки; μ_n – коэффициент трения на поверхности контакта пуансона и заготовки.

Если исследовать эту формулу на экстремум, то можно получить уравнение для определения оптимального угла конусности матрицы (при равенстве $\mu_m = \mu_n = \mu$):

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{опт}}}{2} = \sqrt{\frac{\mu}{2} \left(1 - 0,5 \ln \frac{S_0}{S} \right) \left(1 - \frac{S}{S_0} \right)}.$$

Оптимальный угол наклона матрицы $\alpha = 15^\circ \dots 25^\circ$.



При определении размеров заготовок (полученных обычной вытяжкой) диаметр заготовки D_0 определяют из объема детали W :

$$D_0 = 1,13 \sqrt{\frac{\gamma W}{S}},$$

где γ – коэффициент, учитывающий объем металла, необходимый для операции обрезки кромки детали ($\gamma = 1,08 \dots 1,15$).

При определении диаметра заготовки D_0 в случае, если объем детали неизвестен, можно использовать формулу

$$D_0 = \sqrt{D^2 + \frac{4(D - S)}{S_0} (h + \Delta h - S_0) S},$$

где D – наружный диаметр детали после вытяжки с утонением; Δh – припуск по высоте на обрезку.

Процесс вытяжки с утонением проходит в четыре стадии (рис. 3.25).

Первая и вторая стадии – это деформирования дна и придонного участка (рис. 3.25, б, в). Третья стадия (рис. 3.25, г) – деформирование стенки. Четвертая стадия (рис. 3.25, д) – деформирование краевой части заготовки. Максимальная сила деформирования соответствует первой стадии процесса. Для ее расчета можно воспользоваться формулой $P = \pi d S_d \sigma_B \operatorname{tg}(\alpha + \mu)$, где d – диаметр заготовки; S_d – толщина донной части заготовки.

Для достижения большей степени деформации и сокращения количества вытяжных операций, уменьшения разностенности и кривизны деталей применяют вытяжку через две (рис. 3.26 и 3.27) или три матрицы (рис. 3.28).

Вытяжка через две матрицы может выполняться по схемам последовательной (рис. 3.26) и одновременной (рис. 3.27) вытяжки.



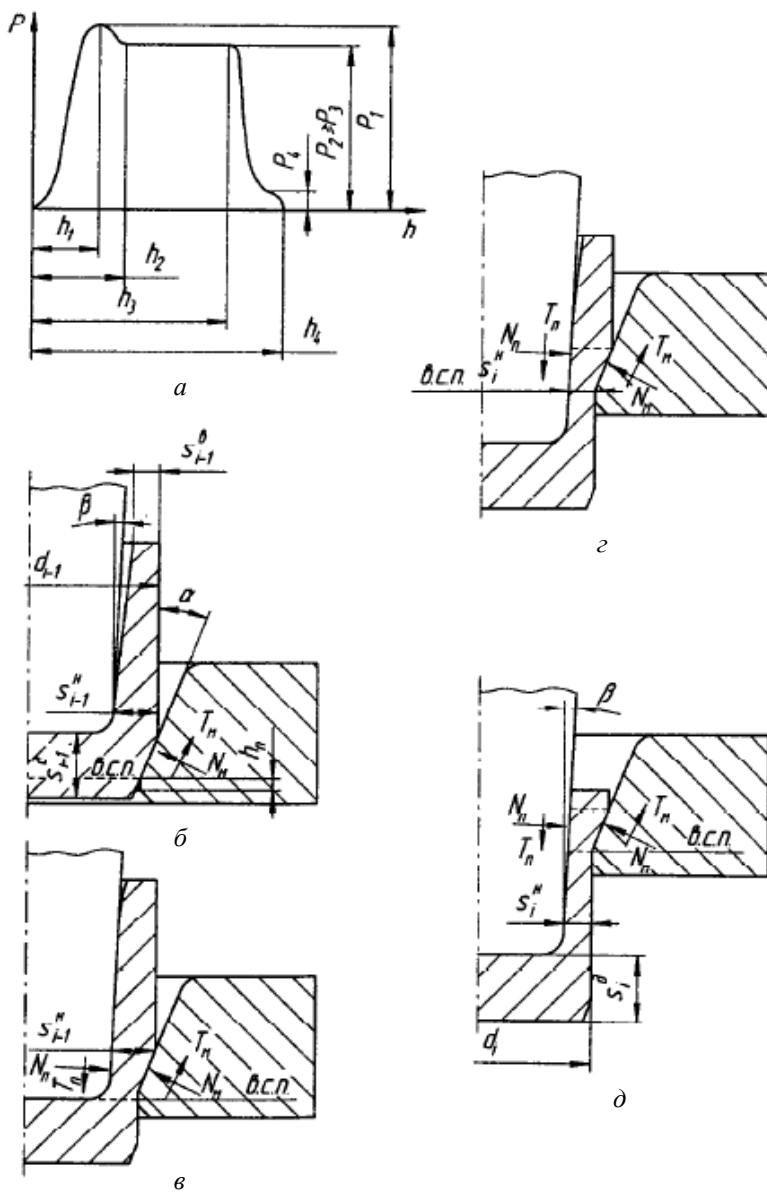


Рис. 3.25. Диаграмма «сила–путь инструмента» и схема формоизменения заготовки по стадиям при вытяжке через одну матрицу



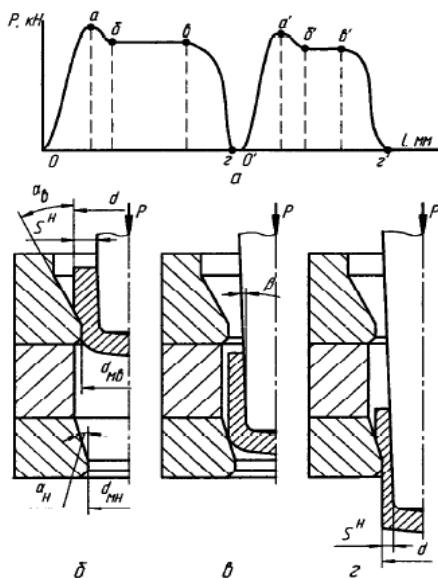


Рис. 3.26. Диаграмма «сила – путь инструмента» и схема формоизменения заготовки в различные периоды последовательной вытяжки

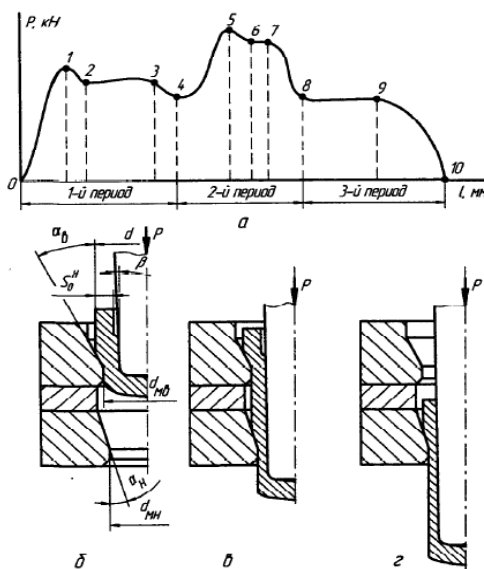


Рис. 3.27. Диаграмма «сила–путь инструмента» и схема формоизменения заготовки в различные периоды одновременной вытяжки



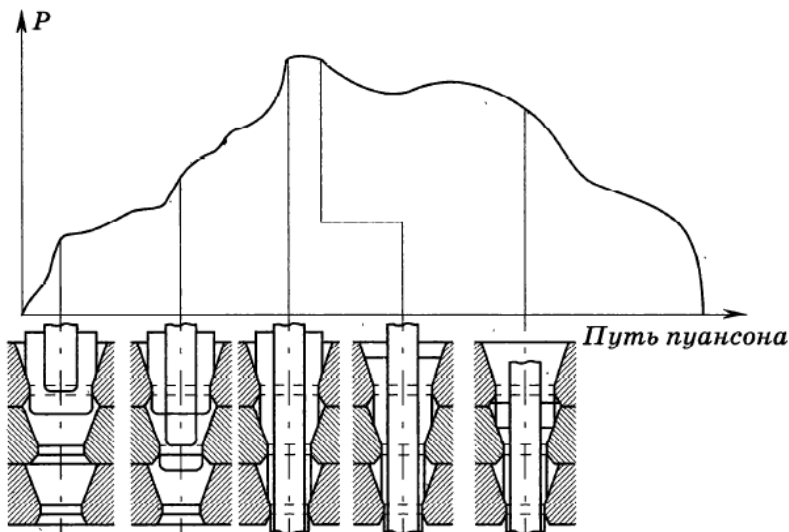


Рис. 3.28. Диаграмма «сила–путь инструмента» при вытяжке через три матрицы

3.3. Обжим

Обжим – это формоизменяющая операция, при помощи которой происходит уменьшение поперечных размеров краевой части полой цилиндрической заготовки. Деформирование заготовки при обжиме осуществляется одним рабочим инструментом – матрицей.

В ходе операции полая заготовка принудительно подается в рабочую полость матрицы, имеющую форму готового изделия или промежуточного перехода (рис. 3.29).

Процесс обжима широко применяется во многих областях машиностроения для формообразования отдельных конструктивных элементов гильз, трубопроводов, наконечников,

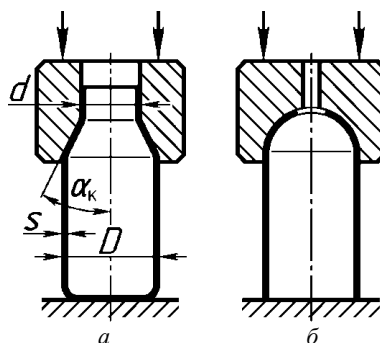


Рис. 3.29. Варианты обжима с получением прямолинейной (а) и криволинейной (б) краевой части



втулок, баллонов высокого давления и т.п. из полых заготовок. Способы обжима различают по следующим признакам:

- направлению действующих на заготовку сил;
- способу фиксации заготовки в штампе (приспособлении);
- виду движения заготовки и рабочего инструмента;
- форме исходной заготовки;
- форме штампуемой детали;
- условиям деформации (температура процесса, скорость деформации, характер нагружения, условия трения);
- типу применяемого оборудования;
- типу среды, передающей давление на заготовку;
- виду деформации.

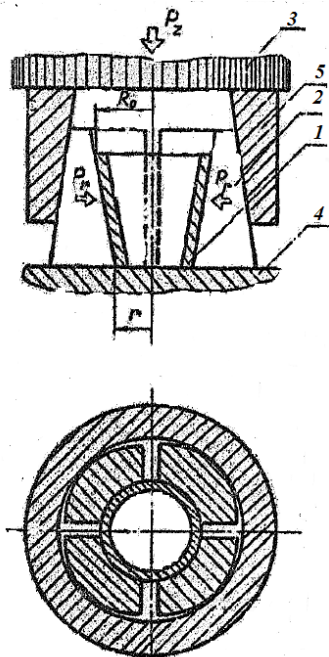


Рис. 3.30. Схема поперечного обжима: 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – нижняя плита; 5 – копия

возможность образования поперечных складок – чем больше площадь свободной поверхности, тем возможность складкообразования выше.

Для характеристики способов обжима в штампах основными признаками следует считать направление действующих сил, способ фиксации и форму исходной заготовки.

По направлению действующих на заготовку сил различают продольный и поперечный обжим. При продольном обжиме сила от механизма нагружения направлена вдоль оси (рис. 3.29), а при поперечном – перпендикулярно оси заготовки, в частности, при изготовлении осесимметричных деталей в радиальном направлении (рис. 3.30). Наиболее широко распространен способ продольного обжима в штампах.

Ограничением процесса обжима является возможность образования продольных (в очаге пластической деформации) или поперечных (в зоне, передающей силу) складок (рис. 3.31). Соотношение свободной и контактной поверхности оказывает существенное влияние на воз-



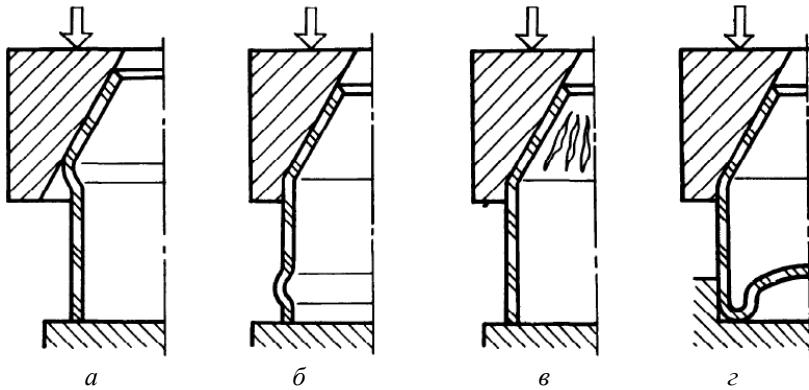


Рис. 3.31. Виды локальной потери устойчивости заготовок при обжиме

По способу фиксации заготовки различают: свободный обжим (рис. 3.29 и 3.31), обжим с подпором по наружной поверхности (рис. 3.32, 3.33, а, 3.34, а), обжим с подпором по наружной и внутренней поверхностям (рис. 3.33, 3.34, б).

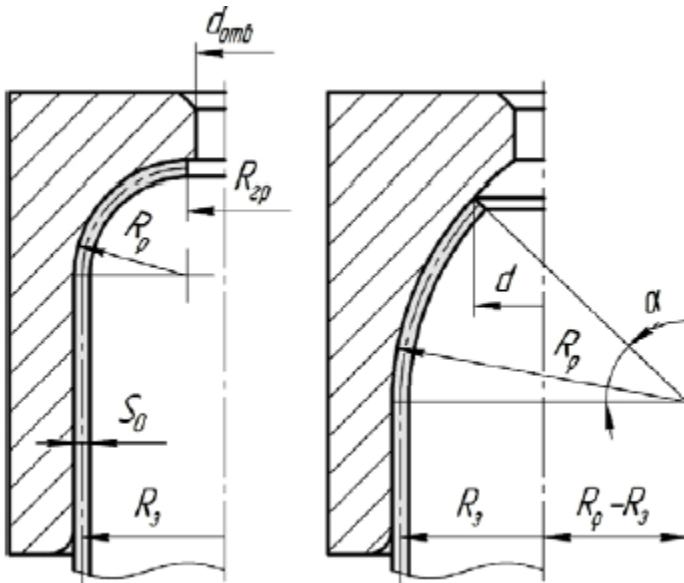


Рис. 3.32. Обжим с подпором по наружной поверхности



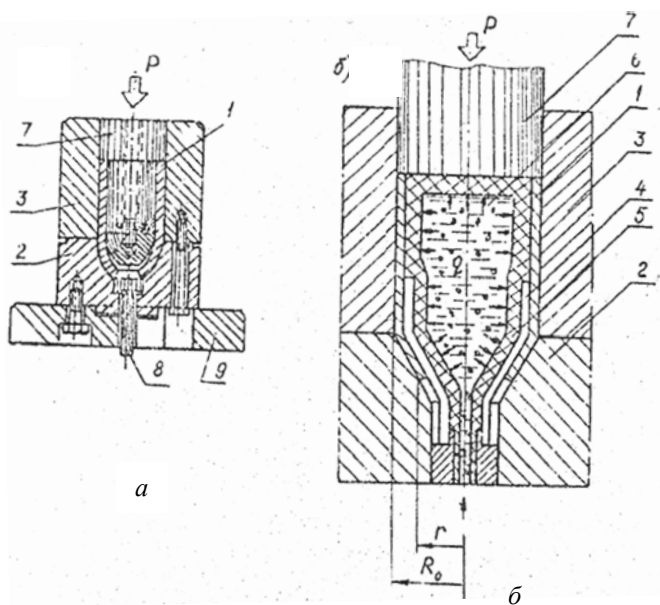


Рис. 3.33. Схемы обжима с подпором по наружной (а) и по наружной и внутренней поверхностям (б): 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – наружный подпор; 4 – разрезная оправка; 5 – пластичный элемент; 6 – жидкость; 7 – пуансон; 8 – выталкиватель; 9 – нижняя плита

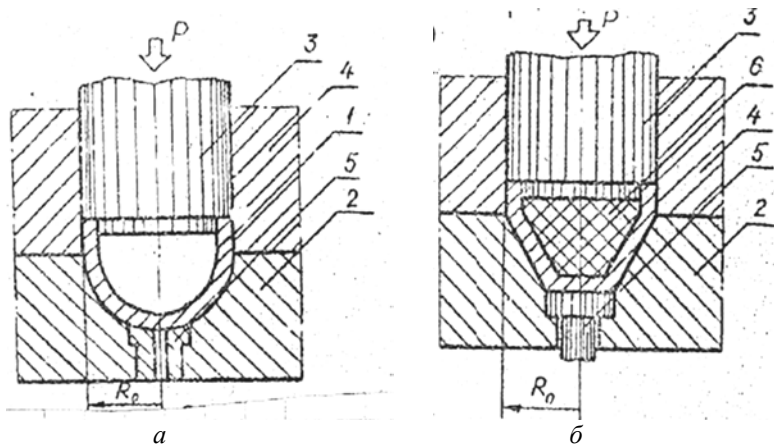


Рис. 3.34. Схемы обжима полых заготовок с дном в полусферической (а) и конической (б) матрицах: 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – наружный подпор; 5 – выталкиватель; 6 – эластичный внутренний подпор



По форме исходной заготовки различают способы обжима трубной и полой с дном заготовки (см. рис. 3.29). Причем обжиму подвергают как открытую часть, так и донную (рис. 3.34).

По форме штампуемых деталей можно выделить обжим в одно- (рис. 3.29, б, 3.31, 3.33, а, 3.34) и многоступенчатых матрицах (рис. 3.33, б, 3.35) с прямолинейной и криволинейной обрабатывающей.

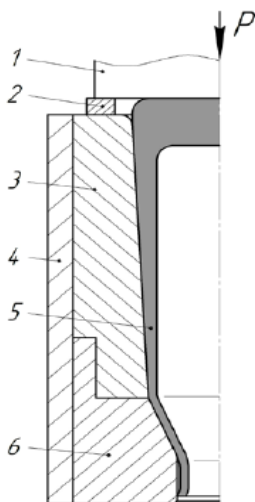


Рис. 3.35. Обжим в многоступенчатой матрице: 1 – толкатель (пуансон); 2 – ограничительное кольцо; 3 – верхняя матрица; 4 – обойма; 5 – деталь (гильза); 6 – нижняя матрица

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние деформируемой части заготовки при одноступенчатом обжиме в конической матрице (рис. 3.36).

Толщину стенки у края можно определить, как и для вытяжки цилиндрических деталей без фланца.

Степень деформации при обжиме оценивается коэффициентом обжима $m_{об}$, который, как и в случае вытяжки без утонения, представляет собой отношение диаметра изделия на последующей операции к диаметру изделия на предыдущей.

В зависимости от соотношения диаметров заготовки D и детали d обжим можно осуществить в одну или несколько операций.

Коэффициенты обжима (средние) составляют для стальных изделий 0,85...0,90; для латунных и алюминиевых 0,80...0,85.



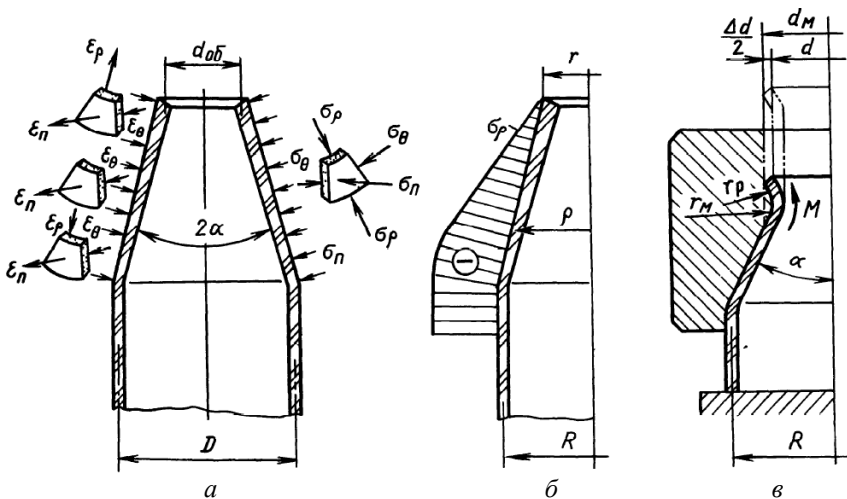


Рис. 3.36. Схемы напряженно-деформированного состояния при обжиге (а), изменение меридиональных напряжений по очагу деформации (б), схема обжима при малом радиусе закругления рабочей кромки матрицы (в)

Предельным коэффициентом обжима $m_{пр}$ считают такой, при котором начинается потеря устойчивости заготовки и образование поперечных и продольных складок. Предельный коэффициент обжима зависит от рода материала, коэффициента трения μ и угла конусности обжимной матрицы α_k . Аналитически он определяется по формуле

$$m_{пр} = 1,3 \left[1 - \frac{\sigma_T}{E_{п}} \left(\sqrt{1 + \frac{E_{п} \cos \alpha_k}{0,65 \sigma_T (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha_k)}} - 1 \right) \right],$$

где $E_{п} = \sigma_{в} / (1 - \psi_y)^2$ – модуль пластичности материала заготовки; ψ_y – относительное равномерное сужение

Оптимальный угол конусности матрицы с точки зрения минимальной силы обжима при хорошей смазке и чистой поверхности заготовки составляет $\alpha_k = 12^\circ \dots 16^\circ$, при менее благоприятных условиях трения $\alpha_k = 20^\circ \dots 25^\circ$. Однако при оптимальных углах конусности матрицы предельный коэффициент обжима на 10...15 % меньше среднего.

Число переходов обжима n : $n = \ln \frac{d}{D} / \ln m_{об_пр}$, рассчитывается с учетом обязательности отжигов между операциями.



При проектировании обжимной матрицы следует учитывать, что размеры детали после обжима увеличиваются из-за упругого пружинения на 0,5...0,8 % по сравнению с номинальными.

Сила обжима в конической матрице $P_{об}$ в основном складывается из двух составляющих: силы обжатия в конусе матрицы P_k и силы изгиба обжатой кромки заготовки до упора в цилиндрический пояс матрицы $P_{из}$. Сила для обжима:

$$P_{об} = P_k + P_{из} = \frac{\pi D s}{2} \left(1 - \frac{d}{D}\right) (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha_k) \times \left[\sigma_T + \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \right] \left(1 + \frac{1}{\sqrt{d/D}}\right) (3 - 2 \cos \alpha_k).$$

На рис. 3.37 показан характер изменения силы при обжиме конусной матрицей. Кривая силы состоит из нескольких участков. Начальный участок Oa соответствует подгибке кромки заготовки на угол конусности матрицы, участок Ob – силе обжатия P_k , участок bc – силе изгиба $P_{из}$. На протяжении от точки O до точки c сила обжима возрастает достаточно интенсивно, а на участке cd , соответствующем скольжению кромки заготовки по цилиндрическому пояску матрицы, возрастает незначительно. На выходе заготовки из матрицы она несколько падает и становится равной силе при установившемся процессе обжима – $P_{об}$.

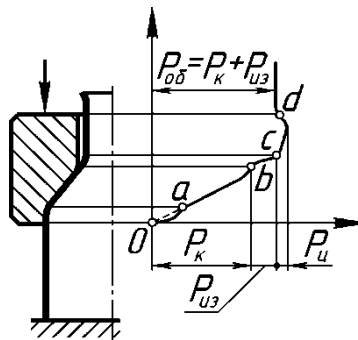


Рис. 3.37. Характер изменения силы обжима

3.3.1. Продольный обжим в конических матрицах

Процесс продольного обжима делится на две основные стадии: неустановившуюся (рис. 3.38, $a, б$) и установившуюся (рис. 3.38, $в$). При этом на неустановившейся стадии в конических матрицах следует различать начальный период внеконтактной деформации (рис. 3.38, a) и текущий период контактной (рис. 3.38, $б$).



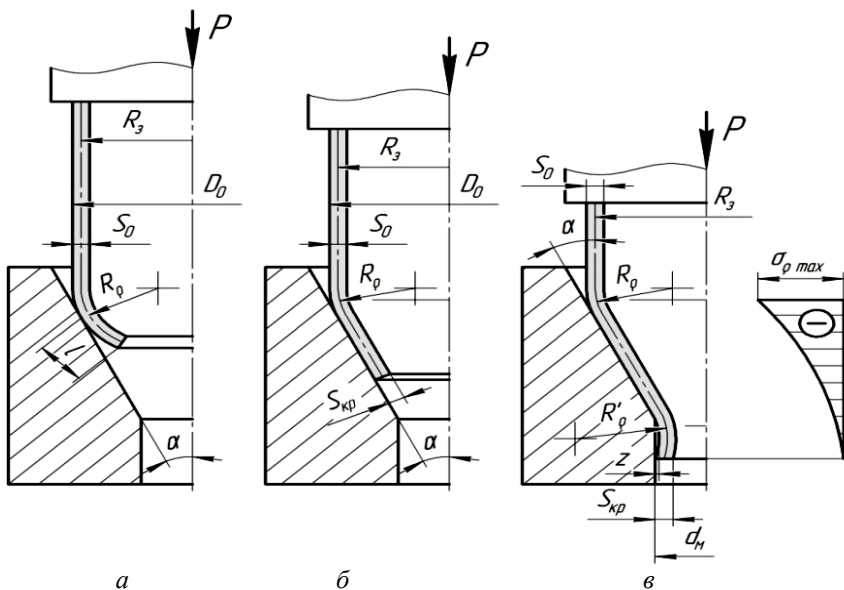


Рис. 3.38. Схема продольного обжима в конической матрице: *а, б* – неустановившаяся стадия; *в* – установившаяся стадия; R_3 – радиус кривизны заготовки в окружном сечении; R_p, R'_p – радиусы кривизны заготовки в меридиональном сечении

В начале процесса происходит изгиб краевой части заготовки, в результате чего образуется участок неприлегания длиной l (рис. 3.38, *а*). При дальнейшем деформировании под действием тангенциальных напряжений σ_θ заготовка спрямляется (рис. 3.38, *б*). С этого момента начинается период контактной деформации, от начала и до завершения которого осуществляется основное формоизменение заготовки, определяющее энергосиловые параметры процесса. При обжиме с выходом в цилиндрическую часть матрицы образуется участок неприлегания. В этом случае диаметр дульца детали меньше диаметра цилиндрической части матрицы на величину удвоенного зазора:

$$\Delta d = 2z = \sqrt{d_m S_{кр}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - S_{кр} (1 - \cos \alpha),$$

где z – односторонний зазор между дульцем детали и цилиндрической поверхностью матрицы; d_m – диаметр цилиндрической части матрицы; α – угол конусности матрицы; $S_{кр}$ – толщина кромки дульца.



Участок неприлегания будет отсутствовать, если радиус закругления матрицы при переходе от конической части к цилиндрической r_m будет больше, чем радиус r_p , известный из теории оболочек:

$$r_p = \frac{\sqrt{DS}}{2 \sin \alpha}.$$

Если $r_m < r_p$, то для получения цилиндрической части (при необходимости) на детали применяют расправочный стержень, который в процессе обжима находится внутри заготовки и после окончания обжима принудительно извлекается из детали, расправляя участок неприлегания.

Максимальные меридиональные напряжения σ_{pmax} действуют в зоне входа заготовки в матрицу на верхней границе очага деформации и цилиндрической части, передающей силу деформирования. Для случая обжима в конической матрице без выхода кромки заготовки в цилиндрическую часть эти напряжения определяют по формуле

$$\sigma_{pmax} = -1,1 \left[\frac{\sigma_B}{2(1 - \psi_y)^2} (3 - 4\psi_y - m) \right] (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \times \\ \times (1 - m) (1 + \sqrt{1/m}) (3 - 2 \cos \alpha).$$

При обжиме с выходом кромки заготовки в цилиндрическую часть увеличение размеров очага деформации, а также изгиб и спрямление элементов заготовки при переходе из конуса в цилиндр вызывают увеличение напряжения σ_{pmax} :

$$\sigma_{pmax} = -1,1 \left[\frac{\sigma_B}{2(1 - \psi_y)^2} (3 - 4\psi_y - m) \right] \times \\ \times [(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)(1 - m) + \sqrt{\lambda} \sin \alpha] (1 + \sqrt{1/m}) (3 - 2 \cos \alpha),$$

где $\lambda = S_{кр}/d$ – относительная толщина кромки детали.

При обжиме в конических матрицах максимальная сила деформирования

$$P_{max} = \pi(D_0 - S_0)S_0 \frac{\sigma_{pmax}}{\cos \alpha}.$$

Приведенные формулы позволяют оценить возможность появления поперечных складок, рассчитать толщину стенки штампуемой детали и технологическую силу обжима.



3.3.2. Продольный обжим в матрицах с криволинейной образующей

В практике холодноштамповочного производства также применяется обжим в криволинейных матрицах, имеющих сферическую, оживальную и другие формы. Радиусы кривизны в меридиональном R_p и окружном R_3 сечениях конечны и являются функциями координат (рис. 3.39).

Максимальные меридиональные напряжения $\sigma_{p\max}$ при обжиме заготовки в матрице, имеющей постоянную кривизну равны:

$$\sigma_{p\max} = -1,1 \left[\sigma_T + \frac{E_n}{2} (1 - m) \right] \times \left[(1 - m)(1 + \mu) + \frac{S_0}{4R_p} \right].$$

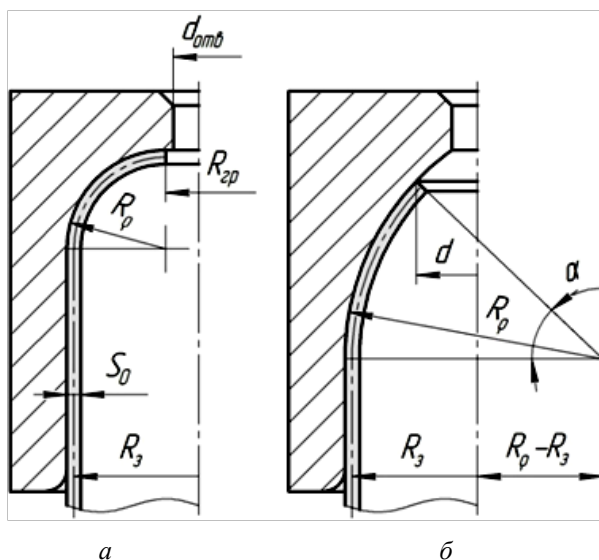


Рис. 3.39. Схема продольного обжима заготовок в матрицах со сферическим (а) и (б) оживальным профилем

Приведенная зависимость справедлива при отсутствии выхода края заготовки на горизонтальный участок и при $R_p \leq 0,5D$.

Получить плоский участок, перпендикулярный оси заготовки, можно лишь при подпоре кромки изнутри. При этом нормальные напряжения, действующие по внутренней поверхности плоского участ-



ка, обеспечат создание внешнего изгибающего момента, достаточного для спрямления элементов, переходящих с криволинейного участка на плоский. Если такого подпора не будет, то краевые элементы начнут загибаться внутрь, что приведет к образованию вывернутой цилиндрической стенки меньшего диаметра.

Если внутренний подпор заготовки обеспечивает получение плоского участка, то максимальные меридиональные напряжения:

$$\sigma_{\rho\max} = -1,1 \left[\sigma_T + \frac{E_{II}}{2} (1 - m) \right] \times \left[(1 + \mu) \left(1 - \frac{2R_{гр}}{D_0} \right) + 1 + \frac{d_{отв}}{2R_{гр}} + \frac{S_0}{2R_{\rho}} \right],$$

где $d_{отв}$ – диаметр отверстия на плоском участке детали; $R_{гр} = 0,5D_0 - R_{\rho}$.

В случае когда обжим осуществляется в матрицах с оживальным рабочим профилем и $R_{\rho} > D_0$ (см. рис. 3.39, б),

$$\sigma_{\rho\max} = \frac{-1,1 \left[\sigma_T + \frac{E_{II}}{2} (1 - m) \right]}{2(1 - \beta)} \times \left\{ \alpha + 2\mu + \alpha(\alpha + \mu) \left[\mu + \frac{\alpha}{2(1 - \beta)} \right] \right\},$$

где

$$\alpha = \arcsin \frac{\sqrt{R_{\rho}^2 - (R_{\rho} - 0,5D_0 + 0,5d)^2}}{R_{\rho}}, \text{ рад};$$

$$\beta = \frac{R_{\rho} - 0,5D_0}{R_{\rho}}, \text{ рад}.$$

Как правило, обжим в оживальных матрицах проводится без выхода кромки заготовки в цилиндрическую часть и на плоский участок.

Максимальная сила деформирования при обжиге в матрицах с криволинейной образующей:

$$P_{\max} = \pi(D_0 - S_0)S_0\sigma_{\rho\max}.$$



3.3.3. Критерии потери устойчивости заготовок при обжиге

Величина допустимой деформации при обжиге ограничивается потерей продольной устойчивости заготовки в зоне, передающей силу, и поперечной устойчивости в зоне очага пластической деформации.

Устойчивость заготовки в зоне, передающей силу. Потеря продольной устойчивости выражается в образовании поперечных складок.

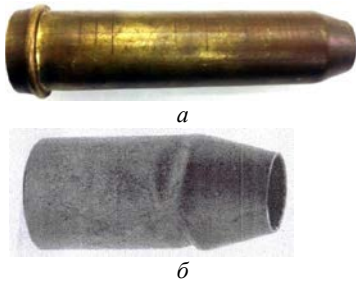


Рис. 3.40. Симметричная (а) и несимметричная (б) формы потери устойчивости

При малой относительной толщине исходной заготовки ($S_0/D_0 \times 100 < 2,0 \dots 2,5$) возникают так называемая несимметричная форма потери устойчивости и ромбовидные складки (рис. 3.40, б), при средней относительной толщине ($S_0/D_0 \times 100 > 2,5$) – симметричная форма потери устойчивости и кольцевые складки (рис. 3.40, а).

Условие потери устойчивости с образованием поперечных складок: $\sigma_{pmax} \geq \sigma_{кр}$, где σ_{pmax} – максимальное меридиональное сжимающее напряжение в стенке заготовки в начальном сечении очага деформации, в месте перехода от корпуса к скату (см. рис. 3.38); $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение. Для приближенной оценки можно принимать $\sigma_{кр} = \sigma_{0,2}$.

Устойчивость заготовки в зоне, передающей силу, повышается с уменьшением меридиональных сжимающих напряжений σ_{pmax} , с увеличением относительной толщины ее стенки ($S_D = S_0/D_0$), а также увеличением показателей, характеризующих способность материала к деформационному упрочнению, и показателей предельно устойчивой деформации ϵ_{iy} .

Предельные коэффициенты обжима m_{np} для случаев штамповки заготовок со средней относительной толщиной ($S_D = 0,02 \dots 0,19$) могут быть рассчитаны по следующим формулам: для случая обжима заготовки без образования дульца

$$m_{np} = 2(1 - \psi_y) - \sqrt{(1 - \psi_y)^2 + \frac{1,6\sigma_{кр} \cos \alpha \times (1 - \psi_y)^2}{\sigma_b(1 - \mu \text{ctg} \alpha)(3 - 2 \cos \alpha)}};$$



для случая обжима заготовки с образованием дульца

$$m_{\text{пр}} = 2(1 - \psi_y) - \sqrt{(1 - \psi_y)^2 + \frac{1,6\sigma_{\text{кр}} \cos \alpha - k(1 - \psi_y)^2}{\sigma_{\text{в}}(1 - \mu \text{ctg} \alpha)(3 - 2 \cos \alpha)}};$$

где

$$k = 1,5 \frac{\sigma_{\text{в}}}{(1 - \psi_y)^2} (1,35 - 2\psi_y) \sqrt{S_D} \sin \alpha.$$

Устойчивость краевой части заготовки в начальной стадии обжима. Одним из факторов, ограничивающих технологические возможности процесса обжима, является складкообразование в зоне очага деформации в начальной и текущей стадиях обжима.

Характерная особенность начальной стадии – резкий изгиб краевой части заготовки, в результате которого образуется небольшой участок неприлегания. Максимальная протяженность этого участка l и радиус кривизны в меридиональном сечении R_{ρ} соответственно равны:

$$l = \sqrt{\frac{S_0 D_0}{4 \cos \alpha}}; \quad R_{\rho} = \frac{\sqrt{0,5 S_0 R_0}}{\sin \alpha},$$

где R_0 – радиус наружной поверхности исходной заготовки.

При достижении участком неприлегания величины l происходит спрямление краевой части под действием изгибающего момента M (рис. 3.41), в результате чего краевая часть вступает в контакт с матрицей.

Экспериментальные исследования показывают, что при некотором критическом соотношении между S_D и α начальная стадия сопровождается потерей устойчивости заготовки в зоне участка неприлегания (рис. 3.42). Дальнейшее деформирование в этих случаях приводит к увеличению амплитуды волн – интенсивному складкообразованию. У разностенных заготовок потеря устойчивости происходит в месте минимальной толщины.

Краевая часть заготовки в момент потери устойчивости представляет собой короткую оболочку высотой l с криволинейной образующей, ограниченную с одной стороны свободной кромкой, с другой – линией контакта с матрицей (см. рис. 3.41).



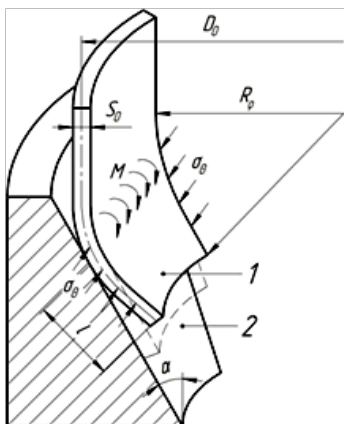


Рис. 3.41. Схема возникновения участка неприслегания в начальной стадии обжима: 1 – заготовка; 2 – матрица



Рис. 3.42. Потеря устойчивости краевой части заготовки в начальной стадии обжима

Обобщенное условие устойчивости:

$$S_0/D_0 > (S/D)_{кр},$$

где $(S/D)_{кр}$ – критическое значение относительной толщины стенки, определяемое для обжима в ступенчатых конических матрицах по формуле

$$(S/D)_{кр} = \frac{k_H}{1 - \frac{\delta_s}{2}} \left[0,125 \operatorname{tg}(\alpha - \beta) + \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2}}{6 \cos(\alpha - \beta)} \right]^2,$$

где k_H – коэффициент, учитывающий неравномерность пластической деформации по объему заготовки (при $\delta_s = 0; 10; 20; 30\%$ соответственно $k_H = 1; 1,02; 1,05; 1,15$); δ_s – относительная разностенность:

$$\delta_s = \frac{S_{0\max} - S_{0\min}}{S_0};$$

$S_{0\max}, S_{0\min}$ – максимальная и минимальная толщина стенки исходной заготовки в рассматриваемом сечении (S_0 принимается за среднее арифметическое значение толщины стенки); α, β – углы конусности матрицы.



Устойчивость краевой части заготовки в текущей стадии обжима. В текущей стадии обжима при больших пластических деформациях возникают продольные складки (рис. 3.43) из-за нарушения устойчивости пластического течения, которое выражается в образовании узких зон интенсивной сдвиговой деформации. Локализация деформации в этом случае является тем возмущением, которое выводит обжимаемую часть заготовки из безмоментного состояния и на нее начинают действовать изгибающие моменты. Если изгибающий момент превышает момент сопротивления пластическому изгибу, происходит образование складок, которые на практике часто называют гофрами. При обжиме заготовок из упрочненного материала может произойти разрушение по плоскостям сдвига.



Рис. 3.43. Образование продольной складки при обжиме

Величина допустимой предельно устойчивой деформации зависит от механических свойств исходного материала ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ϵ_{iy}) и показателя жесткости схемы напряженного состояния при обжиме (K).

Условие локализации деформации, приводящей к образованию продольной складки, можно записать в виде $(\epsilon_i + e_{i0}) > [\epsilon_{iy}]$, где ϵ_i – величина деформации на кромке; e_{i0} – величина предварительной деформации; $[\epsilon_{iy}]$ – предельная устойчивая деформация: $[\epsilon_{iy}] = (2 \dots 2,5)\epsilon_{iy}$.

Опытами установлено, что наибольшую склонность к гофрообразованию имеют материалы типа алюминия ($\epsilon_{iy} = 0,15$), низкоуглеродистой стали ($\epsilon_{iy} = 0,20$) и т.п. При обжиме заготовок из материалов, хорошо упрочняющихся, типа латуней ($\epsilon_{iy} = 0,45$), нержавеющей сталей ($\epsilon_{iy} = 0,39$) и других, образование гофр наблюдается при значительно более высоких степенях деформации. Появлению гофр способствуют царапины и разностенность.

Основные способы предотвращения складкообразования рациональное построение технологического процесса обжима: обоснованный выбор количества операций, геометрии инструмента и заготовки, установление оптимальных условий трения и механических свойств исходного материала, применение способов обжима с подпорами по наружной и внутренней поверхностям заготовки.



3.4. Гибка

Гибкой называют формоизменяющую технологическую операцию листовой штамповки, при которой из плоской или изогнутой заготовки получают изогнутую пространственную деталь путем изменения кривизны срединной поверхности заготовки без существенного изменения ее линейных размеров. Гибка является весьма распространенной операцией листовой штамповки.

Гибка может быть одно-, двух-, трех-, четырех- и многоугольной (рис. 3.44). К ней также относятся операции по закатке краев плоской заготовки. Гибка может совмещаться с другими операциями: отрезкой, вырубкой, пробивкой. Производится она на кривошипных и гидравлических прессах, на горизонтально-гибочных машинах, а также специальных гибочных станках-автоматах.

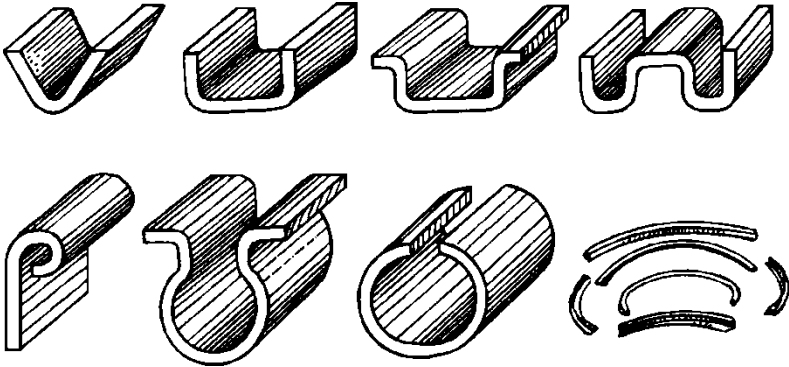


Рис. 3.44. Заготовки, полученные гибкой

Для осуществления операции необходимо приложить изгибающий момент. При гибке в зоне изгиба возникают вначале упругие, а затем пластические деформации, в результате чего заготовка получает прогибы, которые сохраняются и после снятия внешних нагрузок. Слои металла внутри изгиба (со стороны пуансона) сжимаются и укорачиваются в продольном и растягиваются в поперечном направлении (рис. 3.45).

Наружные слои (со стороны матрицы) растягиваются и удлиняются в продольном и сжимаются в поперечном направлении. Между растянутыми и сжатыми слоями (волокнами) находится нейтральный слой, длина которого равна первоначальной длине заготовки. Его по-



ложение в зоне изгиба определяется радиусом ρ . При гибке узких заготовок происходит сильное искажение формы поперечного сечения, которое приводит к уменьшению толщины в месте изгиба, уширению внутри угла и сужению с наружной стороны с образованием поперечной кривизны. При гибке широких заготовок и листов происходит также утонение материала, но почти без искажения поперечного сечения. Лишь по краям происходит деформация, аналогичная поперечной деформации узких заготовок.

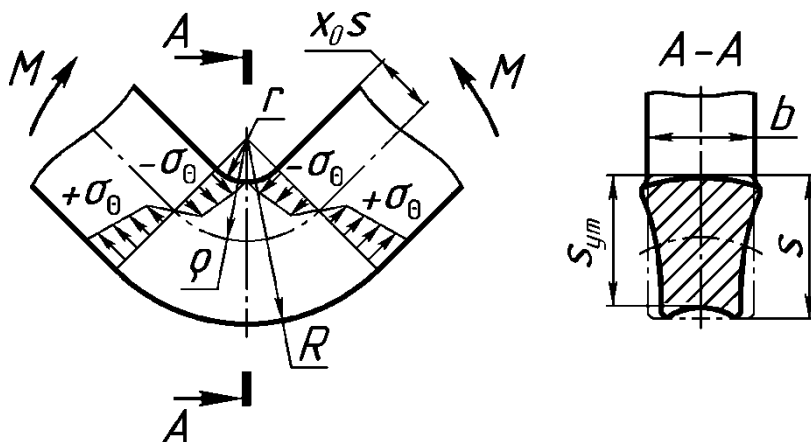


Рис. 3.45. Напряжения в заготовке при гибке и поперечное сечение в зоне изгиба

В результате утонения материала и искажения формы поперечного сечения нейтральный слой в месте изгиба не проходит по середине сечения, а смещается в сторону малого радиуса (внутри угла).

В зависимости от отношения внутреннего радиуса r изгибаемой заготовки к ее толщине s в металле возникает различное напряженно-деформированное состояние. При $r/s > 5$ деформация металла происходит в условиях линейного изгиба, а при $r/s < 5$ в зависимости от отношения ширины заготовки b к ее толщине имеет место или объемное деформированное состояние в случае гибки узких заготовок ($b/s \leq 3$), или плоское при гибке широких ($b/s > 3$) заготовок.

Последовательность процесса угловой гибки приведена на рис. 3.46. На всем протяжении процесса заготовка имеет внутренний радиус кривизны, который больше радиуса пуансона, причем радиус кривизны и плечо изгиба постепенно уменьшаются. Заготовка, касающаяся стенок матрицы в двух точках (рис. 3.46, а), с некоторого



момента оказывается прижатой к пуансону в трех точках (рис. 3.46, а). Только в конце хода, при калибровке, заготовка прилегает к пуансону (рис. 3.46, в). Однако на практике, даже при калибрующем глухом ударе, полного прилегания полок заготовки к поверхности пуансона достичь не удастся.

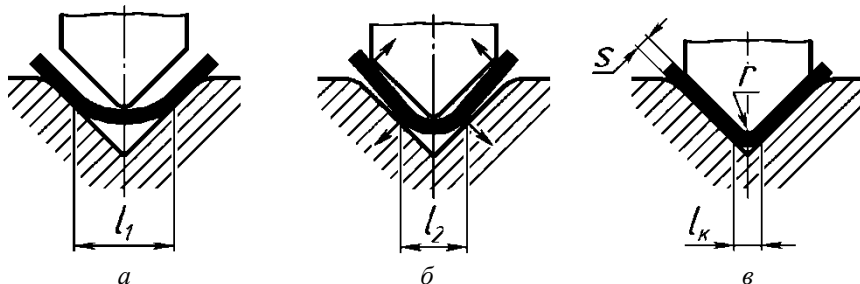


Рис. 3.46. Контакт заготовки с инструментом в ходе одноугловой гибки:
а – в трех точках; б – в пяти точках; в – по поверхности

В холодной листовой штамповке в большинстве случаев применяется гибка с малым радиусом закругления. Для определения размеров заготовки при гибке, а также минимального радиуса закругления пуансона необходимо определить положение нейтрального слоя деформации. Для малых упругопластических деформаций, имеющих место при гибке с относительным радиусом закругления $r/s > 5$, принимают, что нейтральный слой проходит посередине толщины полосы, т.е. $R = r + 0,5s$. При значительных пластических деформациях, когда $r/s < 5$, радиус кривизны нейтрального слоя деформации рекомендуют определять по формуле

$$\rho = \left(\frac{r}{s} + \frac{k_{yT}}{2} \right) k_{yT} s \frac{b_{cp}}{b},$$

где $k_{yT} = s_{yT}/s$ – коэффициент утонения материала; s_{yT} – толщина материала после гибки; b_{cp} – средняя ширина полосы; b – ширина полосы до деформирования. Учитывая, что чаще всего гнут широкие заготовки, у которых ширина во много раз больше толщины и $b_{cp}/b \approx 1$, то радиус кривизны:

$$\rho = \left(\frac{r}{s} + \frac{k_{yT}}{2} \right) k_{yT} s.$$



Коэффициент утонения при гибке k_{yT} зависит от рода материала, относительного радиуса изгиба r/s и угла изгиба α . Расстояние нейтрального слоя от внутренней поверхности изгибаемой заготовки x_0s при гибке широких полос:

$$x_0s = R - r = 0,5s^2k_{yT} - r(1 - k_{yT}).$$

Значения коэффициента k_{yT} и x_0 для гибки под углом 90° широких заготовок из сталей 10...20 приведены в табл. 3.5.

Т а б л и ц а 3.5

Значения коэффициента утонения k_{yT} при одноугловой гибке

r/s	0,10	0,25	0,50	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	Свыше 5,0
k_{yT}	0,82	0,87	0,92	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00
x_0	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44	0,45	0,47	0,48	0,48	0,50

Определение минимально допустимого внутреннего радиуса. Определение минимально допустимого внутреннего радиуса имеет важное значение для практики гибочных работ, поскольку при слишком малом радиусе может произойти разрыв наружных относительно нейтрального слоя деформации волокон материала. Поэтому минимальные радиусы гибки должны быть установлены по предельно допустимым деформациям крайних волокон. За величину допустимых деформаций следует принимать относительное сужение поперечного сечения образца ψ , полученное при испытании материала на растяжение. По известной величине ψ можно определить минимальный радиус гибки: для малых деформаций – по приближенной формуле:

$$r_{\min} = \frac{1 - 2\psi}{2\psi} s ;$$

для больших деформаций – по более точной формуле:

$$r_{\min} = \frac{k_{yT} + 2\psi - 2}{2(1 - \psi - k_{yT})} k_{yT} s .$$

В связи с тем, что механические свойства листового металла после холодной прокатки имеют неоднородность, то предельно допустимые деформации в худшем случае (в направлении прокатки) должны быть уменьшены до $\psi' \approx 0,7\psi$. Минимальный внутренний радиус зависит также от угла гибки, наличия и положения заусенцев на заготовке и других причин.



Можно несколько иначе, определить предельные деформации при гибке.

Наиболее деформированной зоной является центральная, и она же наиболее опасна, с точки зрения разрушения, по сравнению с другими. При деформировании по схеме поперечного изгиба в зоне центрального сечения фактически нет контакта заготовки с инструментом не только по наружной, но и по внутренней поверхности (за исключением начального момента). Установление минимального радиуса изгиба отождествлено с решением задачи о предельной степени деформации за один переход.

В литературе приводятся решения этой задачи без учета влияния гидростатического давления, что, разумеется, нельзя считать правильным.

Наибольшая величина деформации в различных зонах (внутренней и наружной) – у крайних волокон. Интенсивность деформации ε_i при изгибе широких заготовок на наружной и внутренней поверхностях можно определить по формулам

$$\varepsilon_{iH} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{\rho} ; \varepsilon_{iB} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{r} .$$

Значения ε_{iH} и ε_{iB} в общем случае не равны. Наиболее деформированным является волокно на внутренней поверхности, т.е. $\varepsilon_{iB} > \varepsilon_{iH}$. Поэтому появления трещин следует ожидать, казалось бы, вначале на внутренней поверхности. Однако опыты показывают, что первые трещины при изгибе появляются не на внутренней, а на наружной поверхности, причем в средней части листа (при отсутствии заусенцев на кромках). Это легко объяснить влиянием гидростатического давления. При изгибе широких заготовок вид НДС – простой сдвиг, поэтому для наружной зоны $\sigma_1 = (2/\sqrt{3})\sigma_i$, $\sigma_2 = (1/\sqrt{3})\sigma_i$, $\sigma_3 = 0$, для внутренней $\sigma_3 = -(2/\sqrt{3})\sigma_i$, $\sigma_2 = -(1/\sqrt{3})\sigma_i$, $\sigma_1 = 0$.

Гидростатическое давление для наружной зоны $p = -(\sigma_i/\sqrt{3})$ ($K = \sqrt{3} \approx 1,73$), для внутренней $p = (\sigma_i/\sqrt{3}) \times \times$ ($K = -\sqrt{3} \approx -1,73$).

Наличие отрицательного гидростатического давления в наружной зоне приводит к тому, что разрушение крайних наружных волокон произойдет при деформации меньше ε_{ip} . Для внутренней зоны разрушение крайних волокон, если бы оно оказалось возможным, произошло бы при деформациях, больших ε_{ip} .



Исходя из характера влияния гидростатического давления на предельную величину пластической деформации, найдем выражение для минимального радиуса гибки r_{\min} . Под минимальным радиусом гибки будем понимать значение внутреннего радиуса, при котором на наружной поверхности листа достигается предельная степень деформации (т.е. появляются первые трещины).

Если воспользоваться формулой $[\varepsilon_i] = 2\varepsilon_{ip} \exp(-0,72K)$, то при $K = 1,73$ (наружная поверхность заготовки) получим $\varepsilon_{iH} = \frac{\varepsilon_{ip}}{\sqrt{3}} \approx 0,58\varepsilon_{ip}$. На внутренней поверхности при $K = -1,73$ $\varepsilon_{iH} \approx 6,94\varepsilon_{ip}$. Отношение $(\varepsilon_i)_в$ к $(\varepsilon_i)_н$ составит примерно 12.

Проведя определенные действия, получим

$$r_{\min} = \frac{k_{yt}^2 \exp(0,5\varepsilon_{ip}) - 2k_{yt}}{2 - 2k_{yt} \exp(0,5\varepsilon_{ip})} s.$$

Из этого уравнения нельзя явно выразить относительный минимальный радиус гибки $\bar{r}_{\min} = r_{\min}/s$ через ε_{ip} в простой форме, так как толщина после изгиба зависит от отношения r_{\min}/s . Поэтому для определения \bar{r}_{\min} построен график 1 (рис. 3.47).

При изгибе узких заготовок напряжение вдоль ребра изгиба можно принять равным нулю, а напряженное состояние – линейным. Тогда гидростатическое давление для крайних случаев будет равно для наружной зоны $p = -\frac{\sigma_i}{3}$ ($K = 1$), для внутренней $p = \frac{\sigma_i}{3}$ ($K = -1$). Следовательно, и при изгибе узких заготовок разрушение возможно только в слоях наружной зоны и будет происходить при $\varepsilon_{iH} = \varepsilon_{ip}$. При этом минимальный радиус изгиба:

$$r_{\min} = \frac{k_{yt}^2 \exp(\varepsilon_{ip}) - 2k_{yt}}{2 - 2k_{yt} \exp(\varepsilon_{ip})} s.$$

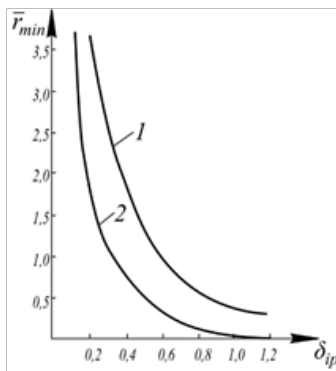


Рис. 3.47. График изменения \bar{r}_{\min} от механических свойств изгибаемой заготовки ε_{ip} : 1 – широкой; 2 – узкой



Сопоставляя полученные результаты для широких и узких заготовок (см. графики 1 и 2 на рис. 3.47), замечаем, что узкие заготовки из того же металла допускают большую степень деформации, чем широкие.

Учет пружинения заготовки. При проведении гибочных операций необходимо всегда учитывать действие упругих деформаций материала, вследствие которых форма изделия после гибки отличается от формы рабочего инструмента. Поэтому при проектировании и изготовлении штампов для гибки необходимо учитывать величину пружинения материала.

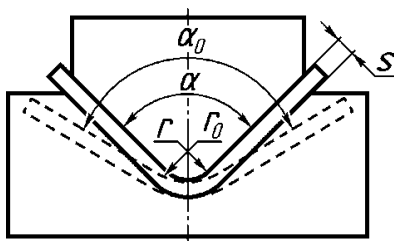


Рис. 3.48. Пружинение при гибке

Упругое пружинение обычно выражается в угловом измерении и является той величиной, на которую следует уменьшить угол гибки, чтобы получить требуемый угол детали (рис. 3.48). Величина упругого пружинения $\Delta\alpha = (\alpha_0 - \alpha)$ различна для свободной гибки без калибровки и для гибки в упор с калибровкой.

Угол пружинения, как показали опыты, зависит от рода и толщины материала, формы детали, относительного радиуса гибки, угла гибки, а также от силы удара. Чем выше предел текучести материала, чем больше относительный радиус, меньше толщина материала и больше угол гибки, тем больше пружинение при прочих равных условиях. При одноугловой гибке пружинение будет больше, чем при двухугловой.

Угол пружинения может быть определен аналитическим расчетом упругой деформации или при помощи испытаний.

Аналитически угол пружинения для одноугловой гибки можно рассчитать по формулам: без упрочнения материала

$$\Delta\alpha = 3 \frac{\sigma_T}{E} \left(\frac{r}{s} + 0,5 \right) \alpha ;$$

с учетом упрочнения (по линейному закону):

$$\Delta\alpha = \frac{1}{E} \left(\frac{3}{2} \sigma_T + \frac{E_n s}{2r + s} \right) \left(\frac{r}{s} + 0,5 \right) \alpha .$$

Из этих формул видно, что на угол пружинения существенно влияет отношение предела текучести к модулю упругости. Упрочне-



ние повышает предел текучести, поэтому наклепанный металл пружинит больше, чем отожженный.

Пружинение заготовки при гибке с относительным радиусом $r/s < 10$ оценивают только углом пружинения, а изменение радиуса в этом случае незначительно и им пренебрегают. Если гибка производится по большому радиусу, когда $r/s > 10$, то корректировка формы гибочного инструмента на пружинение должна быть произведена не только по углу, но и по радиусу. В этом случае радиус закругления гибочного пуансона r с учетом пружинения может быть определен по формуле

$$r = \frac{1}{1/r_0 + 3\sigma_T/Es},$$

где r_0 – требуемый радиус закругления (после пружинения).

Для компенсации угла пружинения при двухугловой гибке могут использоваться способы, представленные на рис. 3.49.

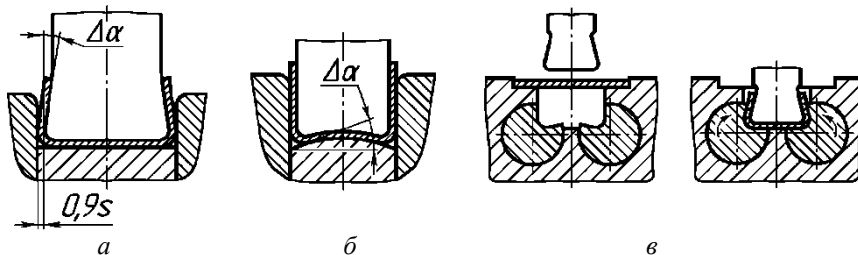


Рис. 3.49. Способы компенсации пружинения при двухугловой гибке:
а, в – поднутрением пуансона, б – радиусным выгибом пуансона и подпора

Определение длины заготовки. Для определения длины заготовки можно пользоваться способом развертки детали, согласно которому нейтральная линия сохраняет при гибке свои первоначальные размеры и расположена в местах скруглений на расстоянии x_0s от внутренней стороны детали. Поэтому для определения длины заготовки сложной детали следует просуммировать длину прямолинейных участков с длиной закругленных, подсчитанной по нейтральному слою.

При гибке с закруглением очень малого радиуса ($r < 0,3s$) наблюдается значительное утонение в местах перегиба и пользоваться способом развертки для определения длины заготовки нельзя. В этом случае длину заготовки определяют исходя из неизменности объема металла заготовки до и после гибки.



Определение силы гибки. Отсутствуют необходимые достоверные сведения о характере изменения величины прогиба по длине пролета, о характере распределения радиальных напряжений по поверхности контакта заготовки с инструментом (пуансоном). Не найдена аналитическая связь между прогибом и степенью деформации, с одной стороны, и между степенью деформации и интенсивностью напряжений, с другой. В результате до настоящего времени не установлена аналитическая зависимость для определения силы изгиба. Приближенные теоретические решения не подтверждаются опытом. Поэтому многие исследователи решили эту задачу экспериментально-теоретическим путем. Ниже изложены результаты одного из таких решений, выполненного М.И. Прудниковым. Проведено деформирование листовых заготовок с различным отношением ширины B к толщине S_0 из разных материалов в штампе, общий вид которого показан на рис. 3.50. Варьируемыми геометрическими параметрами являлись r_m, r_n – радиусы скругления матрицы и пуансона; 2α – двойной угол рабочей части пуансона; l – длина пролета.

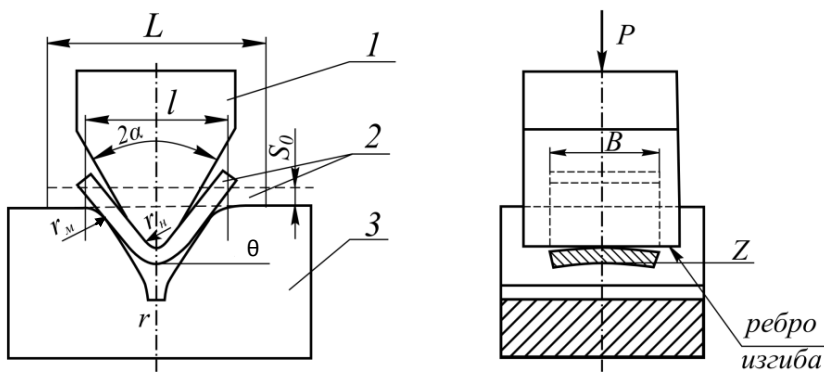


Рис. 3.50. Схема поперечного изгиба в листовой заготовке в штампе:
 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица

Анализ результатов экспериментов показал, что во всех случаях диаграммы «сила изгиба–прогиб» ($P-h$) при изгибе имеют один и тот же вид (рис. 3.51, а).



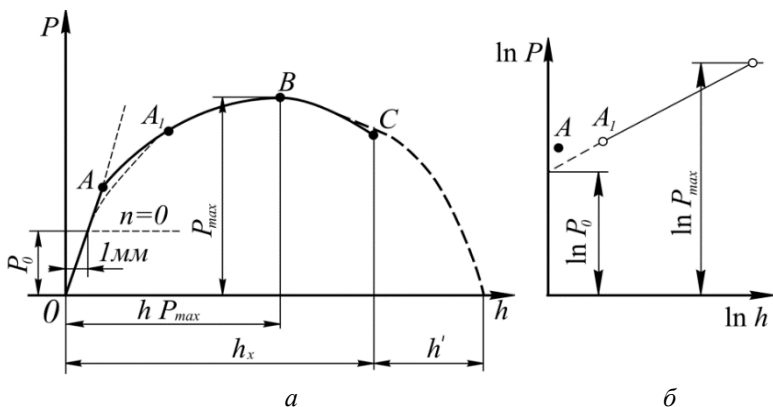


Рис. 3.51. Типовая диаграмма зависимости изгибающей силы P от стрелы прогиба h (а) и представление ее в функциональных шкалах (б)

Диаграмма « $P-h$ » состоит из двух участков: прямолинейного OA и криволинейного AC . Прямолинейный участок соответствует стадии упругого изгиба, криволинейный – пластического. Участок AC , как правило, имеет ярко выраженный максимум, которым он делится на две ветви: восходящую (AB) и нисходящую (BC). Нисходящая ветвь может отсутствовать в следующих случаях:

- при изгибе тонких листов пуансоном с большим $r_m + r_n$, когда r_n значительно превышает толщину листа (так как конечный момент изгиба примерно соответствует прогибу, $h_k = r_m + r_n + S_0$, а s мало по сравнению с $r_m + r_n$, следовательно, $h_k = h_{P_{max}} = h_k = h_{P_{max}} = r_m + r_n$);

- при расстоянии между опорами l , соизмеримом с длиной заготовки L (в этом случае двусторонний зазор значительно превышает сумму $2(r_m + r_n + S_0)$);

- при изгибе малопластичных материалов, разрушение которых может наступить раньше, чем будет достигнуто максимальное значение силы.

За исключением указанных случаев максимум силы не совпадает с конечным моментом гибки, т.е. имеет место неравенство $h_{P_{max}} < h_k$. Указанное относится к двухугловой гибке, если иметь в виду изгиб без подчеканки.

Перестройка диаграммы « $P-h$ » в логарифмические координаты « $\ln P - \ln h$ » показала, что в пределах точности опыта почти все точки



восходящей ветви ее криволинейного участка удовлетворительно укладываются на прямой, наклоненной определенным образом к логарифмическим координатным осям (рис. 3.51, б).

В результате получена формула для расчета силы изгиба вплоть до прогиба $h_{P_{\max}}$, соответствующего максимальной силе:

$$P = 1,5 \frac{BS_0^2 \sigma_T}{(1 + \mu)l} \times \left(\frac{S_0}{r_{\Pi}} \right)^{0,25} \times h^n .$$

На основании теоретических и экспериментальных исследований предложены следующие выражения для определения прогиба: при двухугловой гибке (когда $l = l_0$):

$$h_{P_{\max}} \approx r_M + r_{\Pi} ;$$

при одноугловой, двухугловой гибке с $l > l_0$:

$$h_{P_{\max}} = (r_M + r_{\Pi}) \frac{10 \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 - 9 \left(\frac{l}{l_0} \right) + 1}{22 \left(\frac{l}{l_0} \right) - 20} ,$$

где $l_0 = 2[r_M + r_{\Pi} + (1,05 \dots 1,10)S_0]$.

Показатель степени n зависит от механических свойств материала заготовки (σ_T, σ_{iy}), размеров матрицы и пуансона (r_M, l, r_{Π}) и значения коэффициента трения.

Угловая гибка обычно производится с калибровкой материала, для чего требуется сила калибровки P_K . Эта величина не поддается теоретическому расчету и устанавливается по эмпирической формуле: $P_K = p_K F_K$, где p_K – давление калибровки; F_K – площадь поверхности материала, подлежащего калибровке (правке).

Давление калибровки принимается в зависимости от рода и толщины материала согласно табл. 3.6.

Т а б л и ц а 3.6

Давление калибровки p_K , МПа

Материал	p_K при толщине материала, мм			
	До 1	1–2	2–5	5–10
Алюминий	10–15	15–20	20–30	30–40
Латунь	15–20	20–30	30–40	40–60
Стали 10, 15 и 20	20–30	30–40	40–60	60–80
Стали 25, 30 и 35	30–40	40–50	50–70	70–100



Поскольку сила калибровки значительно больше силы гибки, то пресс в случае одно- и двухугловой гибки с калибровкой подбирают именно по силе калибровки P_k .

3.5. Отбортовка

Под отбортовкой понимают операцию холодной листовой штамповки, в результате которой по внутреннему (отбортовка отверстий) или наружному (внешняя отбортовка) контуру заготовки образуется борт. Отбортовка позволяет получить не только конструктивно удачные формы различных деталей, но и некоторую экономию штампуемого материала. Кроме того, возможно сокращение числа операций.

3.5.1. Отбортовка отверстий (внутренняя)

Отбортовка отверстий широко используется в штамповочном производстве, заменяя операции вытяжки с последующей вырубкой дна. Особенно эффективно применяется отбортовка отверстий при изготовлении деталей с большим фланцем, когда вытяжка затруднительна и требует нескольких переходов. Широко используется эта операция и при изготовлении изделий, в которых на внутренней (отбортованной) части стенки необходимо нарезать резьбу. В настоящее время путем отбортовки получают отверстия диаметром 3...1000 мм и толщиной материала 0,3...30 мм.

В основном выполняют внутреннюю отбортовку круглых отверстий. Образование борта в этом случае осуществляется за счет вдавливания в отверстие матрицы части заготовки с предварительно или одновременно с отбортовкой пробитым отверстием. Схема отбортовки круглых отверстий показана на рис. 3.52 и 3.53. Разновидностью отбортовки является отбортовка с утонением стенки.

При использовании схемы, приведенной на рис. 3.53, б, рабочий конец пуансона выполняют в виде фиксатора (ловителя), обеспечивающего центрирование заготовки по отверстию, с коническим переходом к рабочей части диаметра $d_{\text{п}}$.

Деформация металла при отбортовке характеризуется следующими изменениями: удлинением в тангенциальном направлении и уменьшением толщины материала. На рис. 3.54 показаны начальная и конечная стадия процесса отбортовки пуансоном с плоским торцом.



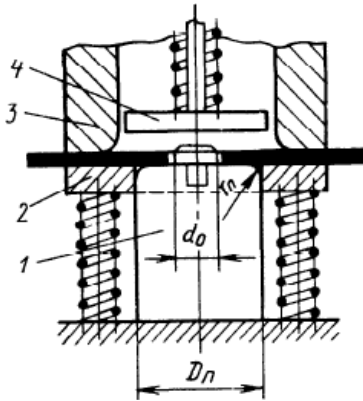


Рис. 3.52. Схема отбортовки цилиндрическим пуансоном с плоским торцом: 1 – пуансон; 2 – съёмник; 3 – матрица; 4 – выталкиватель

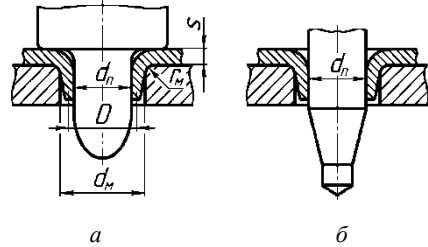


Рис. 3.53. Отбортовка отверстий пуансоном со сферическим (а) и коническим (б) пуансоном

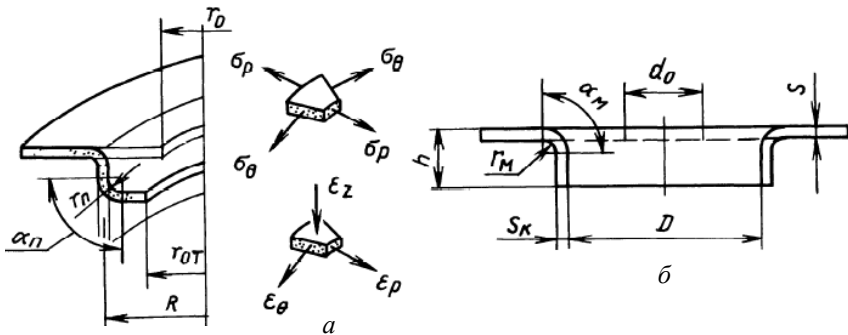


Рис. 3.54. Стадии отбортовки: а – начальная; б – конечная

Зона пластической деформации при отбортовке представляет собой кольцевой участок, ограниченный радиусами $r_{от}$ и R . Напряженное состояние зоны пластической деформации – плоское, характеризуемое двухосным растяжением в окружном и радиальном направлениях. Поэтому пластичность металла заготовки невысокая. Высота горловины (борта), полученная отбортовкой по такой схеме, составляет 0,2...0,3 от диаметра горловины.

Степень деформации при отбортовке отверстий определяется соотношением между диаметром отверстия в заготовке d и диаметром



борта D или так называемым коэффициентом отбортовки: $k_{от} = d_0/D$, $K_{от} = D/d_0$, где d_0 и D определяются по средней линии. Если коэффициент отбортовки превышает предельную величину $k_{от пр}$, то на стенках борта образуются трещины.

Величина предельного коэффициента отбортовки зависит от следующих факторов:

- 1) характера обработки и состояния кромок отверстий (сверление или пробивка, наличие или отсутствие заусенцев);
- 2) относительной толщины заготовки s/D ;
- 3) рода материала и его механических свойств;
- 4) формы рабочей части пуансона.

Зависимость предельно допустимого коэффициента отбортовки от способа получения отбортовываемого отверстия представлена в табл. 3.7, эти же значения для цветных металлов и сплавов – в табл. 3.8.

Зависимость $k_{от пр}$ от относительной толщины заготовки носит обратный характер, т.е. с ростом s/D уменьшается $k_{от пр}$ и увеличивается степень деформации.

Т а б л и ц а 3.7

**Расчетные значения предельного коэффициента отбортовки
для малоуглеродистой стали**

Тип пуансона	Способ получения отверстия	$k_{от пр}$ в зависимости от d_0/s				
		100	50	10	5	1
Сферический	Сверление с зачисткой заусенцев	0,70	0,60	0,36	0,30	0,20
	Пробивка в штампе	0,75	0,65	0,45	0,42	–
Цилиндрический	Сверление с зачисткой заусенцев	0,80	0,70	0,42	0,35	0,25
	Пробивка в штампе	0,85	0,75	0,52	0,48	–

Т а б л и ц а 3.8

Значения предельного коэффициента отбортовки для цветных металлов и сплавов

Материал	s , мм	$k_{от пр}$
Латунь Л62, Л68	0,6–0,7	0,52
	0,7–0,8	0,43
	свыше 0,8	0,40
Алюминий А2	до 0,3	0,71
	свыше 0,3	0,51



Предельный для данного материала коэффициент отбортовки может быть аналитически рассчитан по различным формулам, приведенным в справочниках, учебных и научных изданиях.

На практике также используют графическое представление зависимости предельного коэффициента отбортовки от различных факторов, например приведенную на рис. 3.55.

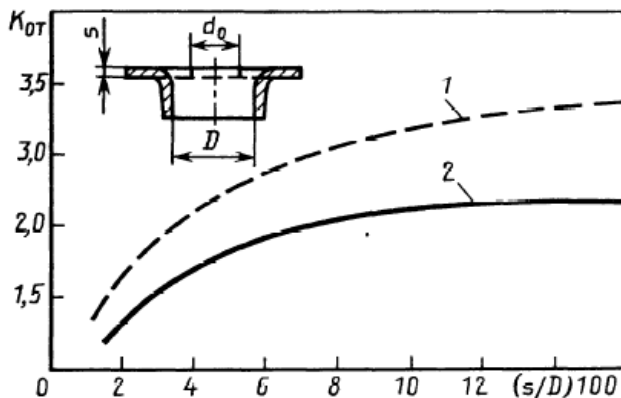


Рис. 3.55. Зависимость предельного коэффициента отбортовки от относительной толщины заготовки для стали 08

При расчете технологических параметров, имея чертеж детали, необходимо определить:

- диаметр отверстия в заготовке для получения борта заданной высоты;
- возможность проведения отбортовки за одну операцию, используя данные о предельном коэффициенте отбортовки для материала заготовки;
- наименьшую толщину стенки борта (сравнить полученное значение с чертежом детали);
- максимальную силу деформирования;
- величину рабочего хода пуансона.

При этом необходимо учитывать схему отбортовки, форму рабочей части пуансона и способ получения отверстия (сверление или пробивка, применение зачистки).

Для относительно высокого борта расчет диаметра d_0 выполняют исходя из равенства объемов заготовки до и после отбортовки. Для низкого борта расчет можно выполнять из условия обычной гибки в радиальном сечении:



$$d_0 = D + 0,86r_m - 2h - 0,57s.$$

Допустимая величина утонения стенки борта при отбортовке вследствие дефектов края отверстия (заусенцы, наклеп и т.п.) значительно ниже, чем величина поперечного сужения при испытании на растяжение. Наименьшая толщина у края борта: $s_k = s\sqrt{k_{от}}$.

Затем проверяют возможность отбортовки за один переход. Для этого сравнивают коэффициент отбортовки с предельным значением $k_{от пр}$: $k_{от} > k_{от пр}$. Если это условие не выполняется, то отбортовку необходимо производить за несколько операций с условием, что между переходами выполняется промежуточный отжиг. При последовательной отбортовке следует принимать $k'_{от} = (1,15 \dots 1,20)k_{от}$. При этом необходимо учитывать, что при многооперационной отбортовке наблюдается значительное утонение стенок борта.

В расчетах необходимо использовать величину радиуса закругления матрицы r_m . Для материалов толщиной до 2 мм и при меньших значениях $k_{от}$ рекомендуется брать r_m в пределах $(4 \dots 5)s$, а для материалов толщиной свыше 2 мм и при больших значениях $k_{от}$ – в пределах $(1,5 \dots 3)s$.

Если принять допущения о монотонности процесса деформирования, виде деформированного состояния на кромке борта в процессе отбортовки (простое растяжение), то можно определить возможность операции за один переход по условию: $\varepsilon_{ик} = \ln(D/d_0) < \varepsilon_{ip}$, где ε_{ip} – интенсивность деформации в момент разрушения цилиндрического образца при испытании его растяжением.

В случае отбортовки некруглых отверстий контур разбивают на выпуклые, вогнутые и прямолинейные участки (рис. 3.56).

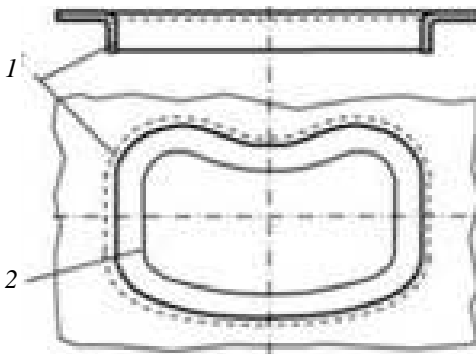


Рис. 3.56. Отбортовка отверстия сложной формы: 1 – борт; 2 – исходное отверстие в плоской заготовке



Можно считать, что на выпуклых участках осуществляются такие же деформации, как и при отбортовке круглых отверстий, на вогнутых участках протекает вытяжка, а на прямых – простая гибка. Расчет на утонение стенок изделия, а также установление коэффициента отбортовки необходимо произвести для участка, имеющего наименьший радиус закругления. Величина коэффициента отбортовки для нецилиндрических отверстий может быть принята на 10...15 % меньше обычных, т.е. $k'_{от} = (0,8 \dots 0,90)k_{от}$.

Сила отбортовки. Силу отбортовки круглых отверстий цилиндрическим пуансоном можно определить по формуле

$$P_{от} = \pi D s \sigma_T \left(1 - \frac{0,5d_0 + 0,57(r_M + r_{п} + s)}{0,5D} + \frac{s}{2r_{п} + s} + \frac{s}{4r_M + 2s} \right) (1 + 1,6\mu).$$

При отбортовке коническим или полусферическим пуансоном эта сила несколько уменьшается (рис. 3.57), но рабочий ход увеличивается, следовательно, увеличиваются высотные размеры пуансона и штампа.

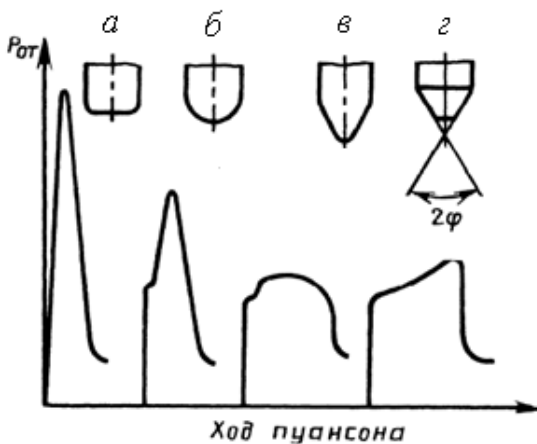


Рис. 3.57. Зависимость силы отбортовки от хода пуансона различной формы

При отбортовке коническим пуансоном (рис. 3.57, г) максимальная сила:

$$P_{max} = m \sigma_B S \sqrt{(D - d_0)(D_M + r_M + d_0)},$$

где $m = \pi(\sin\alpha + \mu \cos\alpha)\cos\alpha$.



При деформировании плоских кольцевых заготовок возможны четыре варианта протекания процесса (рис. 3.58):

- вытяжка цилиндрической детали диаметром d при неизменном диаметре отверстия d_0 (рис. 3.58, а);
- вытяжка цилиндрической детали диаметром d при увеличении диаметра отверстия d_0 (рис. 3.58, б);
- отбортовка горловины с уменьшением диаметра заготовки D_0 (рис. 3.58, в);
- отбортовка горловины при неизменном диаметре заготовки D_0 (рис. 3.58, г).

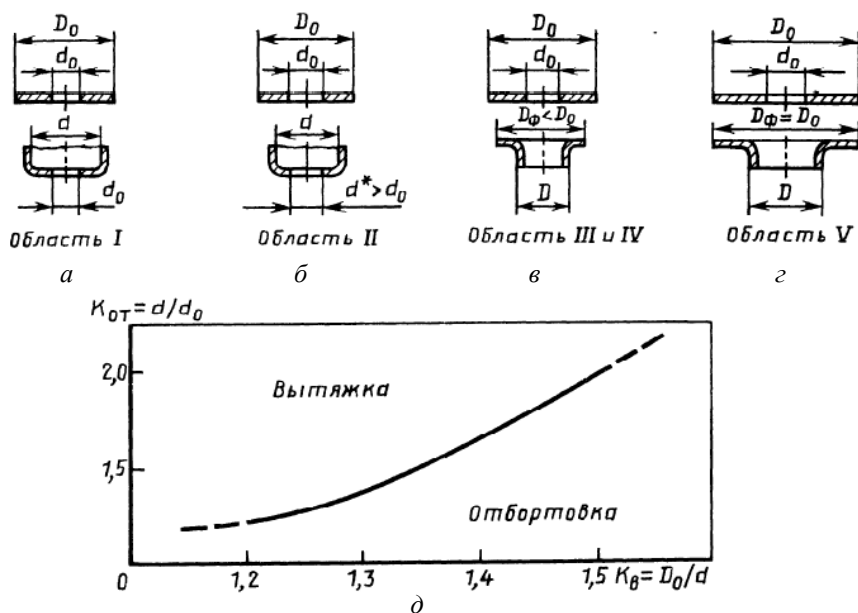


Рис. 3.58. Деформирование плоских кольцевых заготовок: а – г – варианты формоизменения; д – разделение области отбортовки и вытяжки

Особые способы отбортовки. Кроме традиционных способов получения деталей с горловиной применяют и другие (рис. 3.59):

- отбортовка с наложением сжимающих осевых нормальных напряжений по кромке отверстия (рис. 3.59, а);
- отбортовка с наложением сжимающих радиальных напряжений по кромке отверстия (рис. 3.59, б);



- отбортовка с предварительным выглаживанием боковых поверхностей отверстия коническим пуансоном (рис. 3.59, в);
- отбортовка с наложением сжимающих осевых нормальных напряжений в конечный момент деформирования (рис. 3.59, г);
- совмещение отбортовки с предварительной формовкой выступа для горловины, пробивкой отверстия (рис. 3.59, д).

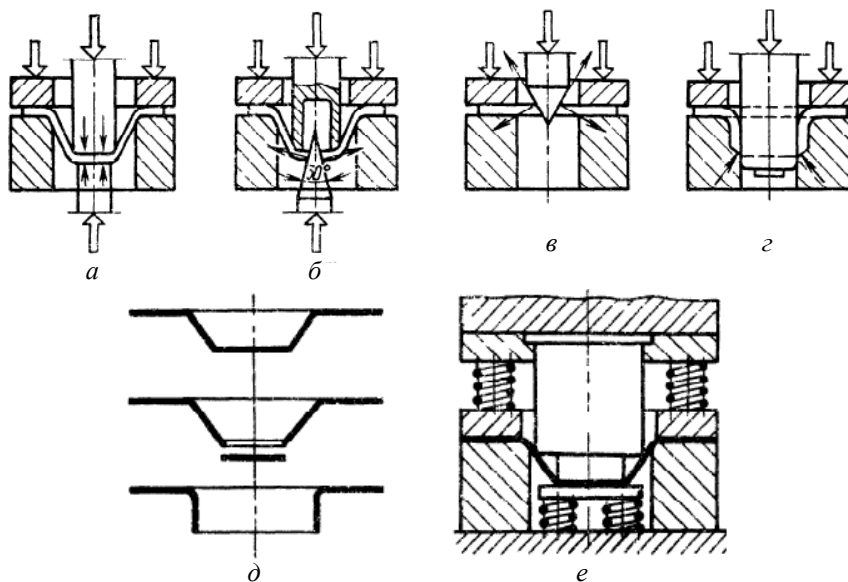


Рис. 3.59. Особые способы отбортовки

Наложение сжимающих напряжений в очаге пластической деформации приводит к повышению пластичности и, следовательно, предельной пластичности металла. Выглаживание кромки отверстия коническим пуансоном устраняет микротрещины, появляющиеся при пробивке отверстия, что также способствует увеличению допустимой степени деформации.

На рис. 3.59, е приведена схема штампа совмещенного действия для формовки, пробивки и отбортовки. Пробивка отверстия осуществляется без матрицы пуансоном, острые кромки которого надрезают обтянутую часть заготовки и затем полностью отделяют отход.

Отбортовка с утонением. Получают горловину с толщиной стенки меньше, чем толщина исходной заготовки, или детали с высокой горловиной (рис. 3.60, а).



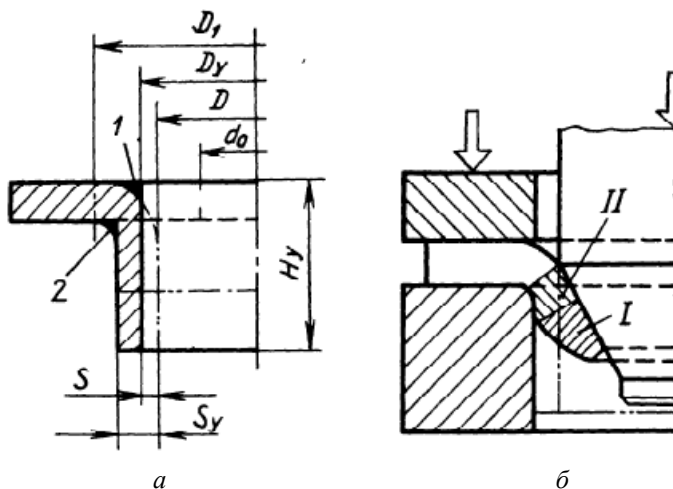


Рис. 3.60. Деталь, получаемая отбортовкой с утонением (а), схема отбортовки (б)

Полученные детали имеют высокую точность диаметральных размеров горловины (7-й или 8-й квалитет), и высокую чистоту поверхности ($R_a = 3,2 \dots 1,6$ мкм). Кроме этого, в результате большей величины пластической деформации твердость горловины возрастает.

Отбортовку с утонением выполняют конусным пуансоном. Сначала осуществляется отбортовка без утонения, а затем, когда в матрицу войдет цилиндрическая часть пуансона, начинается отбортовка с утонением (рис. 3.60, б).

3.5.2. Отбортовка наружного контура (внешняя)

Отбортовка наружного контура криволинейных очертаний является распространенной операцией в автомобильной и авиационной промышленности.

Наружная отбортовка делится на отбортовку выпуклого и вогнутого контуров (рис. 3.61). Отбортовка выпуклого контура по характеру НДС аналогична неглубокой вытяжке без прижима, отбортовка вогнутого контура аналогична отбортовке отверстий.



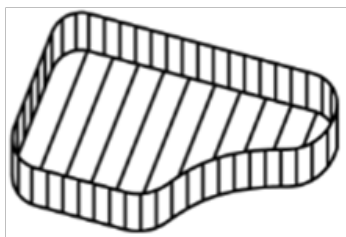


Рис. 3.61. Отбортовка по наружному контуру с элементами вогнутого и выпуклого контура

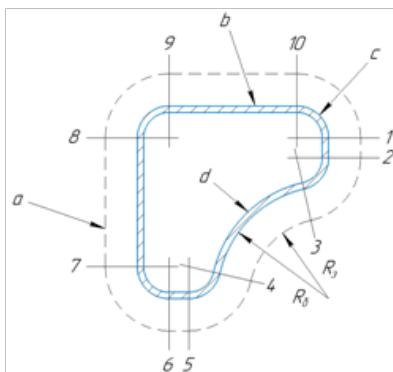


Рис. 3.62. Схема расчета отбортовки: *a* – контур заготовки; *b* – изгиб; *c* – сжатие; *d* – растяжение

Величину деформации при наружной отбортовке выпуклого контура (рис. 3.62) характеризует коэффициент наружной отбортовки:

$$k_{\text{н от}} = R_6/R_3,$$

где R_6 и R_3 – соответственно радиусы отбортованного контура и контура плоской заготовки.

Возможность получения вогнутого борта (участок 3-4) приближенно определяют по формулам: при сопряжении выпуклых и вогнутых участков $k_{\text{ф}} = (0,9 \dots 1)k_{\text{от пр}}$; при сопряжении вогнутых и прямолинейных участков $k_{\text{ф}} = \frac{R_3}{R_6} (0,9 \dots 1)k_{\text{от пр}}$, где $k_{\text{от пр}}$ – табличное значение предельного коэффициента отбортовки внутреннего контура для материала заготовки. Для получения борта, сопрягающегося с дном под прямым углом, высота борта должна быть не менее $(2,5 \dots 3)s$.

Силу отбортовки наружного контура можно приближенно оценить по формуле $P = 1,25kLs\sigma_b$, где k – коэффициент, приближенно равный $0,2 \dots 0,3$; L – длина отбортовываемого контура.

3.6. Раздача

Операция раздачи предназначена для увеличения диаметра краевой или средней части полой цилиндрической заготовки или трубы. Раздача краевой части осуществляется с помощью конического пуан-



сона (рис. 3.63, *а*), раздача срединной части выполняется в штампах с разъемными матрицами, эластичными средами и другими способами (рис. 3.63, *б*). В частности, раздачей производится закатка краев в штампе (рис. 3.63, *в*). Эта операция в соответствии с ГОСТ 18970–84 называется закаткой.

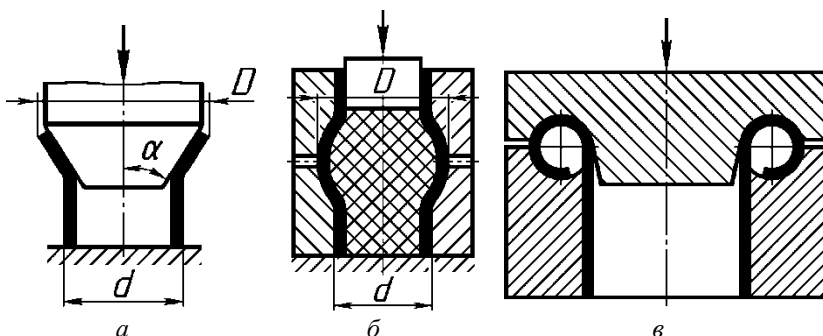


Рис. 3.63. Разновидности раздачи: *а* – краевой части; *б* – срединной части; *в* – закатка края

Рассмотрим раздачу в штампе (рис. 3.63, *а*). Примеры получаемых деталей приведены на рис. 3.64.

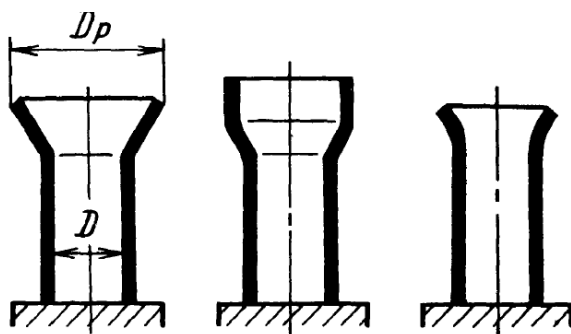


Рис. 3.64. Детали, получаемые раздачей краевой части заготовки

При раздаче со сжатием, осуществляемой коническим пуансоном (рис. 3.65, *а*), схема деформированного состояния зоны пластической деформации объемная. По толщине заготовки (перпендикулярно образующей) и в меридиональном направлении (по длине образующей) происходит укорочение, в окружном – удлинение. Напряженное состояние является практически плоским: сжатие в меридиональном и



растяжение в окружном направлениях; в направлении нормали к толщине заготовки напряжения отсутствуют или очень незначительны, так как внешняя поверхность заготовки не нагружена. На рис. 3.65, б показано изменение напряжений в очаге деформации.

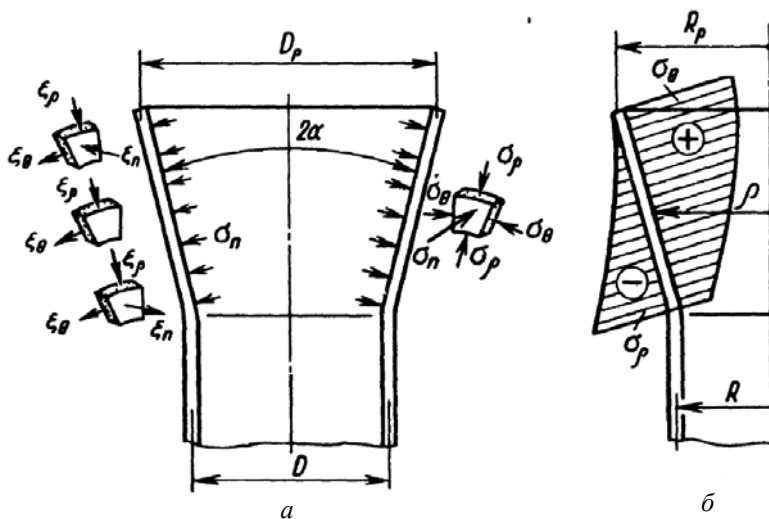


Рис. 3.65. Схемы деформированного и напряженного состояния при раздаче коническим пуансоном

Виды разрушения и локальной потери устойчивости заготовки при раздаче показаны на рис. 3.66.

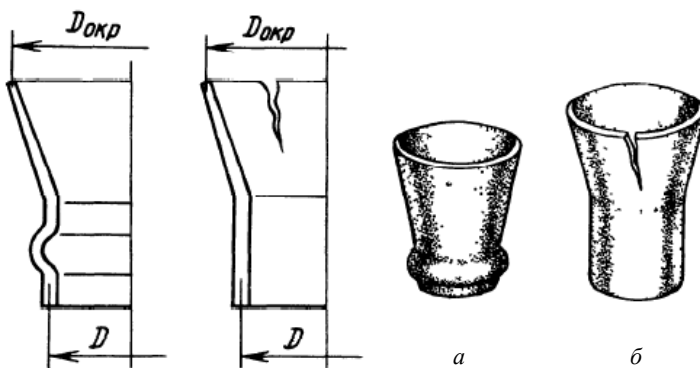


Рис. 3.66. Виды локальной потери устойчивости при раздаче:
а – складкообразование; б – появление шейки и разрушение



Степень деформации при раздаче определяется отношением диаметра полой заготовки d к диаметру растянутой части D , или коэффициентом раздачи $k_{\text{раз}}$:

$$k_{\text{раз}} = d/D.$$

Предельный коэффициент раздачи зависит от механических свойств материала, состояния кромок заготовки, относительной толщины полой заготовки и способа проведения операции.

В научной и учебной литературе приводятся результаты теоретического определения предельного коэффициента раздачи $k_{\text{раз пр}}$ из условия локализации деформации, приводящей к разрушению заготовки. Они сложны, могут даже учитывать анизотропию механических свойств материала заготовки. Результат одного из таких решений:

$$k_{\text{раз пр}} = \frac{1 - \psi}{\exp\left(\sqrt{\frac{2s}{d}} \sin \alpha\right)},$$

где α – угол наклона образующей конического пуансона α к его оси. Оптимальный угол конического пуансона в случае раздачи краевой части заготовки находится в пределах $10...30^\circ$.

На практике используют значения допустимых коэффициентов раздачи, которые на $10...15\%$ больше предельных, определяемых экспериментально. Например, для алюминиевых сплавов коэффициент раздачи составляет $0,75...0,85$, а для мягкой стали можно принимать следующие его значения:

$s/d:$	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
$k_{\text{раз}}$:	0,68	0,66	0,65	0,63	0,62	0,60

Наименьшая толщина у края заготовки:

$$s_{\text{к}} = s \sqrt{k_{\text{раз}}}.$$

Размеры заготовки для раздачи определяют исходя из равенства площадей заготовки и детали без учета изменения толщины материала (рис. 3.67):

$$L = l_0 + \frac{D_p + d + 2r(1 - \cos \alpha)}{4d} \left(\frac{D_p - d}{2 \sin \alpha} - \text{rtg} \frac{\alpha}{2} \right) \times \\ \times \left(1 + \sqrt{\frac{d}{D_p}} \right) + \frac{\pi r \alpha}{180^\circ}.$$



Силу раздачи можно определить по аналитической формуле с некоторыми допущениями:

$$P_{\text{раз}} = \pi d s \sigma_B \times \left[\left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left(\frac{D}{d} - 1 \right) + \sqrt{\frac{4s}{D}} \sin \alpha \right] \times (3 - 2 \cos \alpha).$$

Силу раздачи $P_{\text{раз}}$ можно также определить по упрощенной зависимости: $P_{\text{раз}} = c \pi d s \sigma_B$, где c – коэффициент, зависящий от коэффициента раздачи; $c = 1,0 \dots 0,4$ при $k_{\text{раз}} = 0,70 \dots 0,90$.

Для повышения степени деформации применяют раздачу с подпором по цилиндрической части заготовки. Такой подпор можно осуществить, применив скользящую втулку (рис. 3.68). Степень деформации увеличивается на 25...30%.

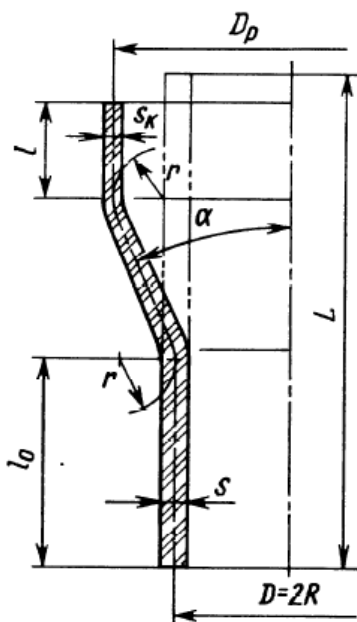


Рис. 3.67. Схема для определения размеров заготовки

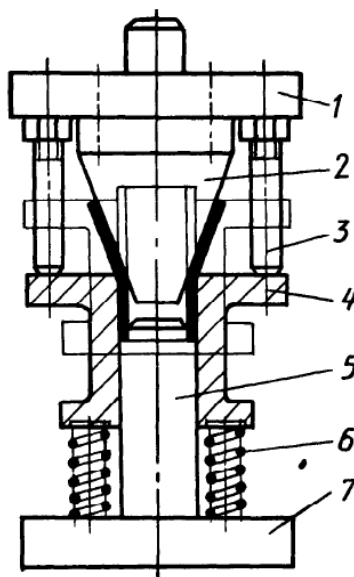


Рис. 3.68. Схема штампа со скользящей втулкой-подпором: 1 – верхняя плита; 2 – пуансон; 3 – толкатель; 4 – скользящая втулка; 5 – опорный стержень; 6 – пружина; 7 – нижняя плита



Штамп состоит из верхней плиты 1 и закрепленных на ней конического пуансона 2 и стержневых толкателей 3. На нижней плите 7 закреплена цилиндрическая опорная оправка 5, диаметр которой D равен наружному диаметру трубной заготовки. По оправке перемещается подпорная втулка 4, опирающаяся на пружины 6. Когда втулка находится в верхнем положении (показано на рисунке штриховой линией), заготовка устанавливается на заплечик оправки 5, при этом она выступает из втулки на $(0,2 \dots 0,3)D$.

При опускании верхней части штампа конический пуансон входит внутрь заготовки и начинает раздавать ее. Одновременно толкатели 3 нажимают на подпорную втулку 4 (сжима пружины 6) и перемещают ее по оправке вниз, давая этим возможность пуансону осуществить полную раздачу трубной заготовки до требуемых размеров. При обратном ходе пружины 6 поднимают втулку 4 вверх вместе с отштампованной деталью.

Предельную степень деформации можно повысить, если на кромке заготовки предварительно получить фланец (рис. 3.69) шириной $(5 \dots 6)s$ при внутреннем радиусе $r \geq s$. При раздаче фланец воспринимает без разрушения более высокие окружные растягивающие напряжения, чем кромка заготовки без фланца. Предельную степень деформации можно увеличить на 15...20%.

Специальные способы раздачи.

Операция раздачи представляет собой расширение пустотелых деталей или трубчатых заготовок, производимое за счет растяжения материалов изнутри в радиальном направлении.

Раздача, как правило, требует применения штампов с разъемной матрицей. Для раздачи применяют следующие типы штампов: с резиновым пуансоном (рис. 3.70, а), с жидкостью вместо пуансона (гидравлическая штамповка) (рис. 3.70, б), с разжимными секциями, раздвигаемыми клиновой вставкой.

В гидравлическом штампе рабочая полость имеет горизонтальный разъем, осуществляемый прижимом, действующим от наружного ползуна. Уплотнение производится специальной манжетой. Пуансон

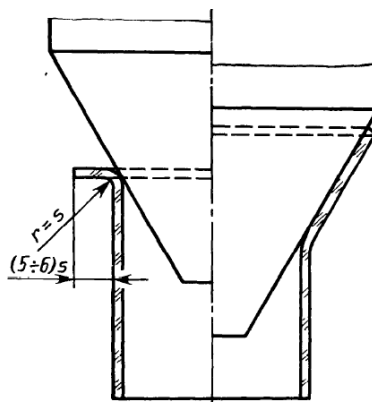


Рис. 3.69. Схема интенсификации раздачи



работает как плунжер, производя давление на налитую в заготовку жидкость (масло, вода). Для впуска и выпуска воздуха он снабжен воздушным каналом с шаровым клапаном.

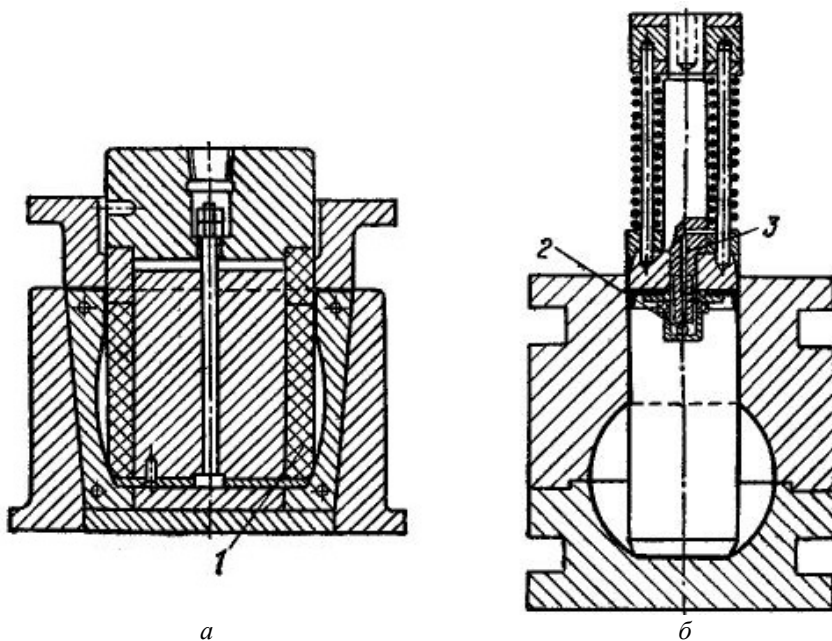


Рис. 3.70. Штмп для растяжки резиной (а) и жидкостью (б):
1 – резина; 2 – шаровой клапан; 3 – воздушный канал

Штамповка с сыпучими наполнителями (дробь, песок) распространения не получила.

Применяли гидравлическую штамповку – раздачу в штампах с вертикальным разъемом матриц на прессах двойного действия, в этом случае пуансон снабжен резиновым мешком с налитым в него глицерином. Общим недостатком такой штамповки является неудобство и сложность ручного разъема матрицы и вынимания готовой детали.

Более просты и производительны штампы аналогичного назначения с резиновым или полиуретановым пуансоном, прикрепленным к внутреннему ползуну пресса. Такие штампы применяются для штамповки бидонов, кофейников и других подобных изделий. Так как заготовки для раздачи обычно получены за две-четыре операции вытяжки, сопровождаемые наклепом металла, то перед раздачей их следует отжигать для восстановления пластичности металла. Риски и



задиры на поверхности заготовки, не говоря уже о задавленных складках, неизбежно ведут к разрыву.

Степень деформации при раздаче может быть увеличена, если одновременно с внутренним радиальным давлением производить осевое сжатие заготовки (схема будет рассмотрена на лекциях немного позже). Местный нагрев заготовки (очага деформации) значительно увеличивает возможную степень деформации.

Операция раздачи применяется также для изготовления крупногабаритных деталей, имеющих криволинейное очертание, для чего применяются способы гидравлической, электрогидроимпульсной и магнитоимпульсной штамповки.

3.7. Формовка

Формовка – это операция, с помощью которой получают местные углубления и выпуклости в листовых и пространственных заготовках за счет уменьшения толщины заготовки при ее неизменных наружных размерах. В большинстве случаев формовка используется для получения ребер жесткости различной конфигурации, рельефных деталей и мембран различного профиля. Схема формовки представлена на рис. 3.71.

Формовкой получают рисунки, ребра жесткости (рис. 3.72), которые увеличивают общую жесткость детали на 100...200%, снижают пружинение (повышение точности), позволяют уменьшить требуемую толщину металла.

Формовка может осуществляться как самостоятельная операция и в комбинации с вырубкой, вытяжкой и другими операциями на фрикционных, кривошипных и гидравлических прессах, как жестким инструментом (рис. 3.73, а), так и подвижным, например эластичной средой (рис. 3.73, б).

При формовке очаг деформации в основном охватывает часть заготовки, расположенную над отверстием матрицы. Схема напряженного состояния близка к схеме двухосного растяжения, и формообразование происходит за счет утонения материала заготовки.

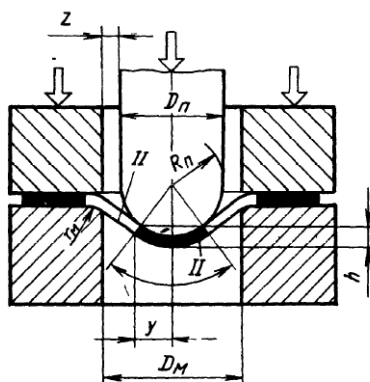


Рис. 3.71. Схема формовки



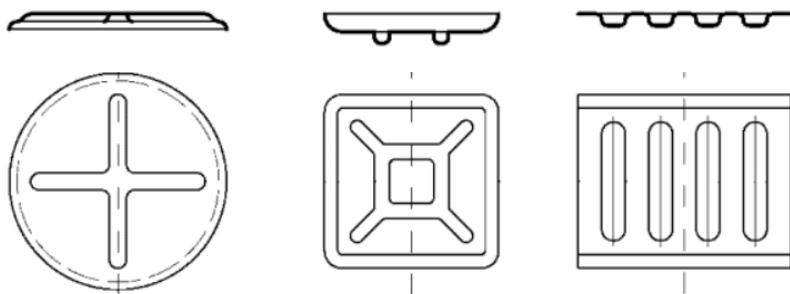


Рис. 3.72. Примеры деталей, получаемых формовкой

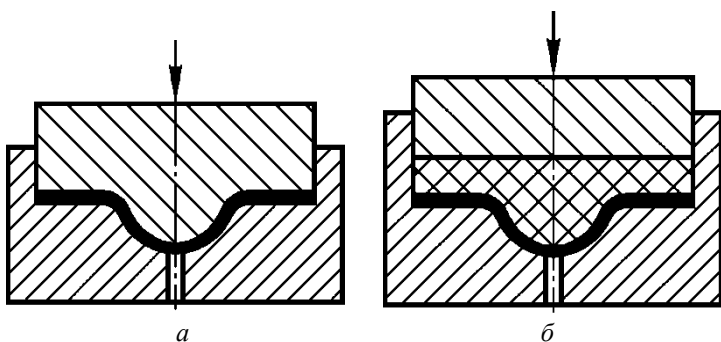


Рис. 3.73. Формовка: жестким (а) и эластичным (б) инструментом

Высота получаемого углубления (рифта) h ограничивается возможностью разрушения заготовки в местах наибольшего утонения и существенно зависит от механических характеристик материала заготовки, от размерных характеристик рабочего инструмента, формы углубления в плане, толщины материала и коэффициента трения. Высота увеличивается с увеличением радиуса закругления кромки пуансона и максимальна, когда торец пуансона имеет сферическую форму (для осесимметричных рифтов). Некоторое влияние на высоту рифта оказывает радиус закругления рабочей кромки матрицы. С увеличением этого радиуса возрастает ширина зоны пластической деформации и облегчается перетекание материала из плоских участков заготовки. Большие значения высоты можно получать для овальной или прямолинейной (в плане) форм углублений.



Формовка ребер жесткости выполняется с прижимом заготовки. При отсутствии прижима может быть нарушена плоскостность или искривление основной поверхности детали. Прижим осуществляется в зоне, окружающей ребро. Ширина зоны прижима – 30...40 толщин металла, удельные силы – 150...250 МПа.

В тех случаях, когда формовка ребер или местных выступов осуществляется за несколько операций, необходимо отштамповать наиболее удаленные от края заготовки элементы, а затем постепенно переходить к краю. При таком способе штамповки утонение материала незначительно и разрывы отсутствуют.

Контактное трение влияние также на расположение зоны наибольшего утонения и распределение толщины материала вдоль образующей. С уменьшением коэффициента трения участок с наибольшим утонением смещается к вершине углубления (например, при формовке гидростатическим давлением наименьшая толщина будет на вершине сферообразного углубления).

Расчет технологического процесса необходимо начинать с оценки предельной штампуемости материала заготовки, что определяет возможность получения данного рифта за одну операцию.

При формовке рифтов необходимо знать их геометрические размеры (рис. 3.74). Формовка такого рифта возможна при условиях: $r \geq 1,5s$; $r_1 \geq 3s$; $R_3 \geq 2s$; $R_1 \geq 5s$.

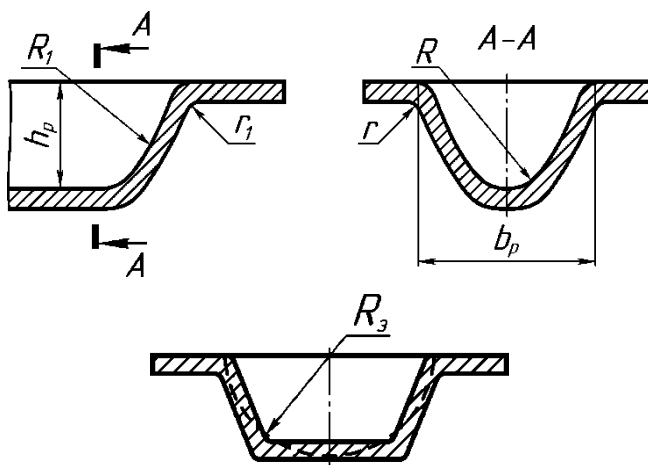


Рис. 3.74. Основные размеры штампуемых рифтов



Давление для формовки ребра жесткости круглого сечения эластичным инструментом:

$$q = \frac{h_p s \sigma_B}{3 b_p L},$$

где $L = 1$ мм – единичная длина рельефа.

Давление формовки ребра жесткости прямоугольного, треугольного или трапецеидального сечения:

$$q = \frac{s \sigma_B}{3 R_3},$$

где R_3 – радиус эквивалентного круга (см. рис. 3.74).

При формовке пространственных заготовок необходимое давление эластичного инструмента приближенно можно оценить, исходя из формулы Лапласа (приняв $\sigma_\rho = \sigma_\theta = \sigma_B$):

$$q = s \sigma_B \left(\frac{1}{R_\rho} + \frac{1}{R_\theta} \right),$$

где R_ρ – радиус получаемой детали в осевом сечении, R_θ – радиус детали в сечении, перпендикулярном осевой линии.

Сила формовки ребер жесткости жестким инструментом:

$$P_\Phi = k L s \sigma_B,$$

где L – длина формируемых ребер; k – коэффициент, зависящий от ширины и глубины рифта, $k = 0,7 \dots 1,0$.

Процесс формовки, если ребро или выступ находятся на расстоянии менее четырех радиусов R , сопровождается, кроме утонения материала, еще и его утяжкой (рис. 3.75). Утяжка вызывает искажение контура плоской части штампуемой заготовки (коробление детали), которое устраняется последующей обрезкой.

Из-за обрезки следует при расчете размера заготовки учитывать дополнительный расход материала.

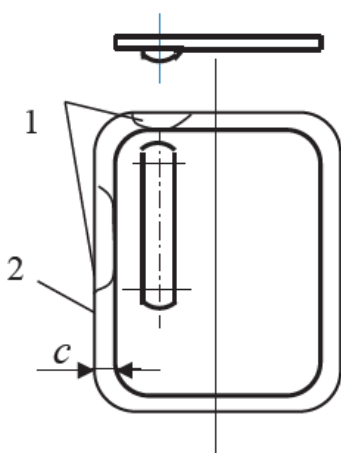


Рис. 3.75. Искажение контура заготовки в связи с утяжкой материала при формовке ребра жесткости: 1 – утяжка, 2 – контур заготовки



Утяжка, а следовательно, и припуск s на обрезку будут тем больше, чем сложнее форма и глубина наносимого рельефа и чем ближе он расположен к наружному контуру. Величина припуска s на обрезку и распределение его по контуру в зависимости от конфигурации и положения штампуемых элементов детали определяют опытом.

При формовке размеры и форма внешнего контура листовой заготовки (как и высота кольцевой и трубчатой заготовки) изменяются незначительно. Поэтому, применяя формовку взамен вытяжки при изготовлении неглубоких деталей с фланцем, можно получить экономию металла вследствие уменьшения поперечных размеров заготовки. При этом повышение прочности (и несущей способности) деталей, полученных формовкой в результате деформационного упрочнения, превалирует над уменьшением прочности вследствие утонения заготовки в зоне деформации.

Операция формовки является второй по распространенности формообразующей операцией, осуществляемой эластичной средой.

Существуют две технологические схемы формовки: по жесткой матрице и по жесткому пуансону (рис. 3.76).

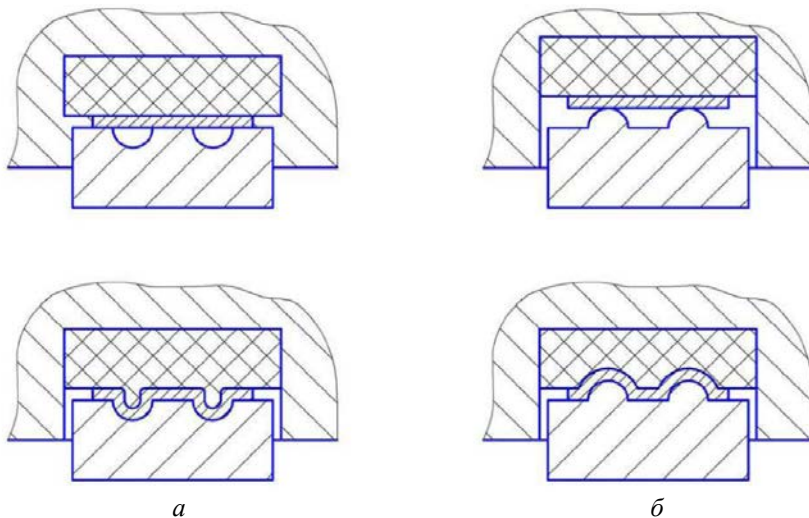


Рис. 3.76. Схемы формовки: *a* – по жесткой матрице;
б – по жесткому пуансону

При использовании первой схемы в начальный момент штамповки заготовка по всей плоскости плотно прижимается к матрице и по-



следующая формовка рельефа осуществляется за счет утонения материала в очаге деформации.

Вторая схема обеспечивает возможность подтяжки материала заготовки в очаг деформации, снижает величину утонения, но при этом возникает вероятность потери заготовкой устойчивости (гофрообразования), что значительно ограничивает технологические возможности процесса (формовка только мелкого рельефа).

В отличие от инструментальных методов формовки, где заготовка испытывает знакопеременную неоднородную деформацию или где требуется применение сложных штампов с прижимом, при штамповке эластичной средой деформация развивается более равномерно, последовательно, что снижает уровень возникающих в детали остаточных напряжений, приводит к меньшему ее короблению (рис. 3.77).

Местные кольцевые выступы в сварных обечайках и трубчатых заготовках получают формовкой жестким инструментом в штампе или эластичной и жидкостной средой в разъемной матрице (рис. 3.78).

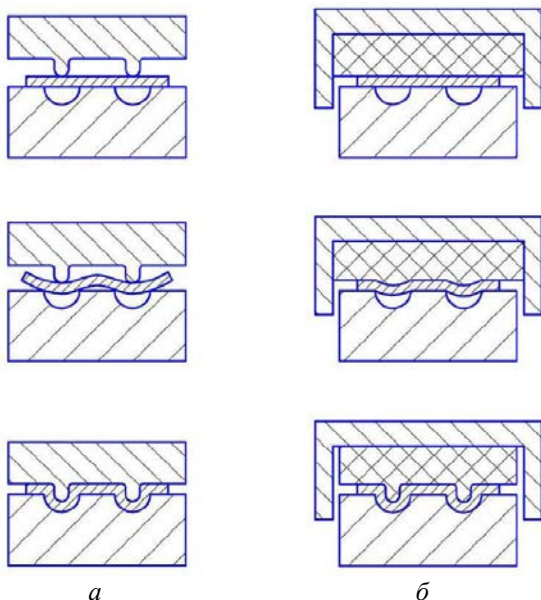


Рис. 3.77. Последовательность деформирования заготовки при выполнении операции формовки: *a* – в инструментальном штампе; *б* – эластичной средой

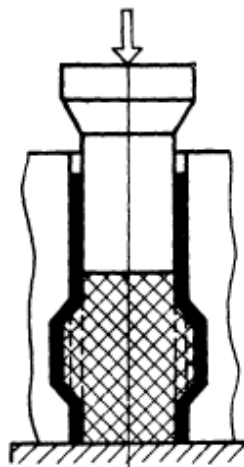


Рис. 3.78. Схема формовки эластичной средой



4. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Методика оценки технологичности конструкции детали с использованием показателей и уровней технологичности

Технологичность конструкции детали в соответствии с ГОСТ 14.205–83 – это совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Под показателями качества деталей, изготавливаемых листовой штамповкой, следует понимать требования по точности размеров, шероховатости поверхности детали, обеспечение формы детали, заданных характеристик механических свойств, обеспечивающих эксплуатационные свойства детали.

Оценка технологичности конструкции детали или изделия (ТКИ) на любой стадии проектирования изделия и технологического процесса его изготовления включает следующие этапы:

- определение исходных данных;
- анализ исходных данных;
- выбор номенклатуры показателей технологичности;
- расчет базовых значений показателей технологичности и (или) контрольных уровней технологичности;
- расчет показателей технологичности детали;
- оценку уровня технологичности конструкции детали;
- разработку рекомендаций по повышению уровня технологичности детали за счет технологических решений;
- технологический контроль конструкторской документации.

Определение исходных данных начинают с подбора комплекта конструкторской документации (чертеж детали, технические условия на изготовление). Необходимо проанализировать, при наличии, техническое задание на проектирование технологического процесса. В результате анализа устанавливают: вид и степень новизны детали, форму детали, общее количество ее конструктивных элементов, унифицированных, стандартизованных и повторного применения, допус-



каемые отклонения на размеры и форму детали и ее конструктивные элементы; требования к шероховатости поверхности, физико-механические свойства материала в исходном состоянии (отожженном или в состоянии поставки) и готовой детали, эксплуатационные требования; объем выпуска и тип производства, возможные методы обработки и виды технологических процессов изготовления детали. При анализе могут быть установлены аналоги детали, конструктивные и технологические решения.

Анализ исходных данных включает подготовку ведомостей структурного состава детали, определение методов обработки, вида технологических операций и способов их выполнения.

При структурном анализе выделяют конструктивные элементы (в виде элементарных объемов или поверхностей), требующие для изготовления каждого из них отдельных операций штамповки, специального инструмента и технологической оснастки. Определяют общее количество конструктивных элементов детали, их форма, количество унифицированных, стандартизованных и повторного применения элементов детали. Устанавливают методы обработки, виды технологических операций и способы их выполнения для изготовления подобных конструктивных элементов и деталей-аналогов в целом.

Ведомость состава методов обработки служит для выбора вида частных показателей технологичности. Номенклатура показателей технологичности устанавливается в зависимости от вида детали, объема выпуска и типа производства, стадии проектирования, содержания исходной информации и технического задания. Контрольные уровни показателей могут устанавливаться методом экспертной оценки и расчетно-аналитическим методом.

Рассмотрим показатели и контрольные уровни технологичности для некоторых операций листовой штамповки (табл. 4.1 – 4.4).

Методика расчета частных показателей технологичности для операции в целом и комплексного показателя технологичности для технологического процесса, содержащего несколько операций листовой штамповки, разработана и используется в курсовом и дипломном проектировании в Балтийском государственном техническом университете «Военмех» им. Д.Ф. Устинова.



Т а б л и ц а 4.1

**Контрольные уровни показателей ТКИ заготовок и деталей,
изготавливаемых отрезкой, вырубкой, пробивкой**

Номер группы показателей ТКИ	Наименование группы показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ	Уровень технологичности		
			высокий	средний	низкий
1	2	3	4	5	6
1	Расход материала	Масса детали, кг	менее 0,1	0,1...1,0	более 1,0
		Цена материала, руб./кг	менее 200	200...400	более 400
		Коэффициент использования металла, %	более 75	50...75	менее 50
2	Штампуемость материала	Сопротивление срезу, МПа	менее 260	260...520	более 520
		Относительная глубина внедрения пуансона в металл до начала разрушения	более 0,5	0,2...0,5	менее 0,2
3	Сложность формы	Общая форма детали	Плоская, осесимметричная и симметричная	Плоская симметричная удлиненная	Плоская несимметричная, пространственная
		Общее количество конструктивных элементов в детали	1	2...10	более 10
		Относительное количество стандартизированных, унифицированных и повторного применения конструктивных элементов	более 0,5	0,2...0,5	менее 0,2
		Габаритные размеры, мм	менее 100	100...500	более 500
		Относительная толщина для вырубки	менее 0,1	0,1...0,25	более 0,25
		Относительная толщина для пробивки	менее 0,5	0,5...1,0	более 1,0
		Относительный радиус сопряжения элементов контура при вырубке	более 0,5	0,3...0,5	менее 0,3



Окончание табл. 4.1

1	2	3	4	5	6
3	Сложность формы	Относительный радиус сопряжения элементов контура при пробивке	более 0,7	0,5...0,7	менее 0,5
		Относительная ширина выступов и пазов	более 0,85	0,65...0,85	менее 0,65
		Допускаемые отклонения на размеры	более Н14 (h14)	Н12 (h12) - Н14(h14)	менее Н12 (h12)

Т а б л и ц а 4.2

Контрольные уровни показателей ТКИ заготовок и деталей, изготавливаемых вытяжкой без утонения

Номер группы показателей ТКИ	Наименование группы показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ	Уровень технологичности		
			высокий	средний	низкий
1	2	3	4	5	6
1	Расход материала	Коэффициент использования металла, %	более 75	50...75	менее 50
2	Штампуемость материала	Сопротивление металла деформированию, МПа: - предел текучести; - временное сопротивление	менее 200	200...350	более 350
			менее 320	320...600	более 600
		Способность к деформационному упрочнению, σ_T/σ_B	менее 0,6	0,6...0,75	более 0,75
		Предельная устойчивая деформация ε_{iy}	более 0,25	0,15...0,25	менее 0,15



3	Сложность формы	Общая форма детали	Одноступенчатые цилиндрические без фланца	Одноступенчатые цилиндрические с фланцем, с криволинейной образующей, симметричные	Многоступенчатые с различной формой образующей, несимметричные
		Общее количество конструктивных элементов в детали	1	2...10	более 10
		Относительное количество стандартизованных, унифицированных и повторного применения конструктивных элементов	более 0,50	0,25...0,50	менее 0,25
		Габаритные размеры, мм	менее 100	100...500	более 500
		Относительная высота детали, %	менее 46	46...124	более 124
		Относительная толщина стенки детали, %	более 6	2,5...6	менее 2,5
		Перепад толщины дна и стенки	менее 0,90	0,90...0,95	более 0,95
		Относительный диаметр фланца	менее 1,25	1,25...2,00	более 2,00
		Относительный радиус сопряжения стенки и дна	более 9	2...9	менее 2
		Относительный радиус сопряжения фланца и стенки	более 30	10...30	менее 10
		Относительный радиус кривизны образующей стенки	менее 5	5...15	более 15
		Допускаемые отклонения по диаметру, %	более 1,0	0,5...1,0	менее 0,5
Допускаемые отклонения на продольную разнотолщинность, %	более 20	7...20	менее 7		



1	2	3	4	5	6
3	Сложность формы	Допускаемые отклонения на конусность, %	более 10	0,5...10	менее 0,5
		Допускаемая разновысотность, %	более 10	5...10	менее 5
4	Сложность механических свойств	Степень упрочнения в зоне кромки	менее 1,7	1,7...2,0	более 2,0
		Степень неравномерности прочностных свойств	1,1 – 1,7	1,7...2,0	более 2,0
		Наличие и назначение покрытия	без покрытия	покрытие защитное или декоративное	покрытие защитно-декоративное или специальное

Т а б л и ц а 4.3

Контрольные уровни показателей ТКИ заготовок и деталей, изготавливаемых вытяжкой с утонением

Номер группы показателей ТКИ	Наименование группы показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ	Уровень технологичности		
			высокий	средний	низкий
1	2	3	4	5	6
1	Расход материала	Коэффициент использования металла, %	более 90	75...90	менее 75
2	Штампующесть материала	Сопrotивление металла деформированию, МПа: - предел текучести - временное сопротивление	менее 200	200...350	более 350
			менее 320	320...600	более 600
		Способность к деформационному упрочнению, σ_T/σ_B	менее 0,6	0,6...0,75	более 0,75
		Предельная до разрушения пластичность ϵ_{ip} ψ	более 1,05	0,80...1,05	менее 0,80
более 0,65	0,55...0,65		менее 0,55		



3	Сложность формы	Общая форма детали	Одноступенчатые цилиндрические	Конические, многоступенчатые	Неосесимметричные
		Общее количество конструктивных элементов в детали	1	2...10	более 10
		Относительное количество стандартизированных, унифицированных и повторного применения конструктивных элементов	более 0,50	0,25...0,50	менее 0,25
		Габаритные размеры, мм	менее 100	100...500	более 500
		Относительная высота детали	0,9	0,9...1,9	более 1,9
		Относительная толщина стенки детали, %	более 7,5	5...7,5	менее 5
		Перепад толщины дна и стенки	более 5	3...5	менее 3
		Относительный радиус сопряжения стенки и дна по внутренней поверхности	0,5...0,8	0,3...0,5	менее 0,3
		Допускаемые отклонения по диаметру, %	более 0,25	0,10...0,25	менее 0,10
		Допускаемая разновысотность, %	более 10	5...10	менее 5
4	Сложность механических свойств	Степень упрочнения	менее 2,0	2,0...2,3	более 2,3
		Степень неравномерности механических свойств в продольном направлении	1,03...1,05	1,05...1,10	более 1,10 менее 1,03



Т а б л и ц а 4.4

**Контрольные уровни показателей ТКИ заготовок и деталей,
изготавливаемых обжимом**

Номер группы показателей ТКИ	Наименование группы показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ	Уровень технологичности		
			высокий	средний	низкий
1	2	3	4	5	6
1	Расход материала	Коэффициент использования металла, %	более 95	90...95	менее 90
2	Штампуемость материала	Сопrotивление металла деформированию, МПа: предел текучести	менее 260	260...520	более 520
		Способность к деформационному упрочнению, σ_T/σ_B	менее 0,6	0,6...0,75	более 0,75
		Упругопластические свойства $\sqrt{E_k E_c}/E$	0,1...1,0	0,01...0,10	менее 0,01
		Предельная устойчивая (равномерная) ϵ_{iv}	более 0,25	0,15...0,25	менее 0,15
3	Сложность формы	Общая форма детали	Осесимметричная, ступенчатая без dna	Осесимметричная, многоступенчатая с dnом	Неосесимметричные
		Общее количество конструктивных элементов в детали	1	2...10	более 10
		Относительное количество стандартизированных, унифицированных и повторного применения конструктивных элементов	более 0,50	0,25...0,50	менее 0,25



3	Сложность формы	Габаритные размеры, мм	менее 100	100...500	более 500
		Относительная высота детали	менее 1,0	1,0...10	более 10
		Относительная толщина стенки детали, %	более 2,7	0,9...2,7	менее 0,9
		Перепад диаметров	более 0,80	0,65...0,80	менее 0,65
		Допускаемые отклонения на поперечные размеры, квалитет	13...16	11, 12	7...10
		Допускаемые отклонения на продольную разнотолщинность, %	более 25	10...25	менее 10
4	Сложность механических свойств	Степень упрочнения (для стали)	менее 1,3	1,3...1,5	более 1,5
		Степень неравномерности механических свойств в продольном направлении	менее 1,3	1,3...1,5	более 1,5

Примечание. E , E_k , E_c – модуль нормальной упругости, касательный и секущий модули.

Рассмотрим в качестве примера анализ технологичности конструкции детали, изображенной на рис. 4.1, и предложим меры по повышению технологичности ее конструкции.

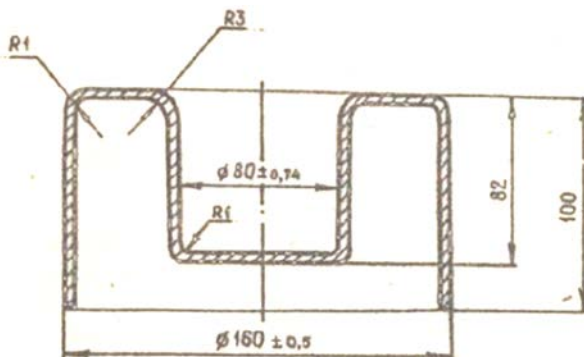


Рис. 4.1. Деталь «поплавок»



Деталь необходимо изготовить вытяжкой без утонения в условиях крупносерийного производства.

Анализ исходных данных

1. Материал детали – медь М1.
2. Механические свойства меди М1 в отожженном состоянии:
 $\sigma_{0,2} = 70 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{в}} = 250 \text{ МПа}$, $\delta = 35\%$.
3. Характеристика формы детали:
 - 1) деталь ступенчатая, полая, с дном, с параллельным расположением ступеней;
 - 2) толщина стенки принимается одинаковой во всех сечениях:
 $S_0 = S = 1 \text{ мм}$, где S_0 – толщина исходной заготовки;
 - 3) общее количество конструктивных элементов в детали – 4 (табл. 4.5). Участки сопряжения не выделяются в качестве конструктивных элементов;
 - 4) конструктивные элементы имеют форму цилиндра и плоских дисков (табл. 4.6).
4. Характеристика качества поверхности детали.
Требования по шероховатости поверхности не заданы.
5. Требования по физико-механическим свойствам не заданы.
6. Тип производства – крупносерийное.
7. Основные способы формообразования – прямая и реверсивная (обратная) вытяжка без утонения.
8. Вид исходной заготовки – плоский кружок.
9. Способ изготовления исходной заготовки – вырубка из полосы в штампе.

Выбор номенклатуры базовых показателей и контрольных уровней технологичности

Показатели технологичности назначены в зависимости от вида принятого способа штамповки – вытяжки без утонения.

Контрольные уровни технологичности назначены для исходной заготовки – кружка по расходу материала (см. табл. 4.1) и детали – по выделенным непосредственно для вытяжки без утонения показателям ТКИ (см. табл. 4.2).

Численные значения коэффициента использования металла определены как произведение показателей по уровню для вырубki и вытяжки.



Вид показателей ТКИ и численные значения контрольных уровней приведены в ведомости расчета показателей ТКИ (табл. 4.6).

Расчет и оценка технологичности конструкции детали

Результаты расчета численных значений частных показателей ТКИ приведены в табл. 4.7. Коэффициенты значимости для групповых показателей ТКИ назначены: первая группа показателей ТКИ – 0,54; вторая – 0,09; третья – 0,33; четвертая – 0,04. Коэффициенты значимости для конкретного показателя в группе приняты в равных долях от группового коэффициента. Численные значения коэффициента использования металла определены как произведения показателей по уровням для вырубки и вытяжки.

Выделены нетехнологичные параметры детали по частным показателям (табл. 4.7).

Проведенная оценка по комплексному показателю технологичности соответствует среднему уровню технологичности детали в целом.

Разработка рекомендаций по повышению уровня технологичности конструкции детали

Из возможных методов и приемов повышения ТКИ можно предложить методы оптимизации конструктивных параметров детали и разработки принципиально новых технологических схем штамповки. В качестве оптимизируемых параметров приняты все параметры, выделенные как нетехнологичные по частным показателям (табл. 4.8). Ввиду отсутствия математических моделей оптимизации, по выделенным параметрам оптимизации осуществили путем подбора частных численных значений нетехнологичных параметров детали из интервала значений контрольных уровней средней и высокой технологичности (см. табл. 4.6).

Рекомендации по повышению уровня технологичности по частным параметрам и соответствующая корректировка численных значений показателей ТКИ приведены в табл. 4.8.

С учетом корректировки деталь в целом соответствует уровню высокой технологичности



Ведомость структурного состава детали

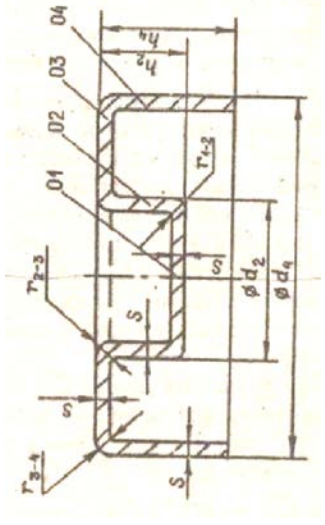
Эскиз детали	Код конструктивного элемента	Наименование конструктивного элемента	Характеристика конструктивного элемента
	01	Дно	Плоское, сплошное, неунифицированное, нестандартизированное, первичного применения
	02	Внутренняя стенка	Цилиндрической формы, неунифицированная, нестандартизированная, первичного применения
	03	Фланец	Плоский, неунифицированный, нестандартизированный, первичного применения
	04	Наружная стенка	Цилиндрической формы, неунифицированная, нестандартизированная, первичного применения



Таблица 4.6

**Ведомость расчета контрольных уровней ТКИ для деталей,
изготавливаемых вытяжкой без утонения**

Номер группы показателей ТКИ	Наименование группы показателей ТКИ	Вид и наименования показателя ТКИ	Уровень технологичности											
			Высокая технологичность, ВТ				Средняя технологичность, СТ				Низкая технологичность, НТ			
			П _г	П* _г	qП* _г	П _г	П* _г	qП* _г	П _г	П* _г	qП* _г	П _г	П* _г	qП* _г
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	Расход материала	Масса детали, кг	менее 0,1	3	0,54	0,1...1	2	0,36	более 1	1	0,18			
		Цена материала, руб	менее 200	3	0,54	200...400	2	0,36	более 400	1	0,18			
		Коэффициент использования металла, %	более 90	3	0,54	90...75	2	0,36	менее 75	1	0,18			
2	Штампованность материала	Способность к деформационному упрочнению, σ_T/σ_B	менее 0,60	3	0,27		2	0,18		1	0,09			
3	Сложность формы	Общая форма детали	Одноступенчатые цилиндрические	3	0,09	Одноступенчатые цилиндрические с фланцем, с криволинейной образующей	2	0,06	Многоступенчатые с различной формой образующей, симметричные	1	0,03			



Продолжение табл. 4.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	Сложность формы	Общее количество конструктивных элементов в детали	1	3	0,09	2...10	2	0,06	более 10	1	0,03
		Относительное количество стандартизованных, унифицированных и повторного применения конструктивных элементов	более 0,5	3	0,09	0,50...0,25	2	0,06	менее 0,25	1	0,03
		Габаритные размеры, мм	менее 100	3	0,09	100...500	2	0,06	более 500	1	0,03
		Относительная высота детали, %	менее 0,46	3	0,09	0,46...1,24	2	0,06	более 1,24	1	0,03
		Относительная толщина стенки детали, %	более 6	3	0,09	2,5...6	2	0,06	менее 2,5	1	0,03
		Относительный диаметр фланца	менее 1,25	3	0,09	1,25...2	2	0,06	более 2	1	0,03
		Относительный радиус сопряжения 3 и 4	более 9	3	0,09	9...2	2	0,06	менее 2	1	0,03
		Относительный радиус сопряжения 2-3	более 30	3	0,09	10...30	2	0,06	менее 10	1	0,03
		Относительный радиус сопряжения 1-2	более 9	3	0,09	9...2	2	0,06	менее 2	1	0,03
		Допускаемые отклонения по диаметру, %	более 1	3	0,09	0,5...1	2	0,06	менее 0,5	1	0,03



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	Сложность механических свойств	Степень упрочнения, σ_b / σ_{b0}	механические свойства не назначаются	3	0,06	до 2 у среза	2	0,04	более 2 у среза	1	0,02
		Наличие и назначение покрытия	без покрытия	3	0,06	покрытие защитное или декоративное	2	0,04	покрытие защитно-декоративное или специальное	1	0,02

Примечания. P_T – показатель технологичности, выраженный в натуральных значениях параметра; P_T^* – показатель технологичности, выраженный в баллах в принятой системе трехбалльной оценки; q – коэффициент значимости; qP_T^* – показатель технологичности, выраженный во взвешенных баллах.

Т а б л и ц а 4.7

Ведомость расчета показателей ТКИ штампуемой детали «поплавок»

Номер группы показателей ТКИ	Наименование группы показателей ТКИ	Вид и наименование показателя ТКИ	Показатели ТКИ			Оценка ТКИ по частным показателям	
			P_T	P_T^*	q		qP_T^*
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Расход материала	Масса детали, кг	от 0,1 до 1,0	2	0,18	0,36	СТ
		Цена материала, руб	более 400	1	0,18	0,18	НТ
		Коэффициент использования металла, %	от 0,75 до 0,90	2	0,18	0,36	СТ
2	Штампуемость материала	Способность к деформационному упрочнению, σ_t / σ_b	0,28	3	0,09	0,27	ВТ



Окончание табл. 4.7

1	2	3	4	5	6	7	8
3	Сложность формы	Общая форма детали	Многоступенчатая	1	0,03	0,03	НТ
		Общее количество конструктивных элементов в детали	4	2	0,03	0,06	СТ
		Относительное количество стандартизованных, унифицированных и повторного применения конструктивных элементов	0	1	0,03	0,03	НТ
		Габаритные размеры, мм	160	2	0,03	0,06	СТ
		Относительная высота детали, %	1,42	1	0,03	0,03	НТ
		Относительная толщина стенки детали, %	0,63	1	0,03	0,03	НТ
		Относительный диаметр фланца	2	2	0,03	0,06	СТ
		Относительный радиус сопряжения 3 и 4	1	1	0,03	0,03	НТ
		Относительный радиус сопряжения 2-3	3	1	0,03	0,03	НТ
		Относительный радиус сопряжения 1-2	1	1	0,03	0,03	НТ
4	Сложность механических свойств	Допускаемые отклонения по диаметру, %	0,62	2	0,03	0,06	СТ
		Степень упрочнения, σ_b / σ_{H0}	Механические свойства не назначаются	3	0,02	0,06	ВТ
		Наличие и назначение покрытия	Покрытие защитно-декоративное	1	0,02	0,02	НТ



Разработка рекомендаций и корректировка показателей ТКИ с учетом реализации рекомендаций

Вид показателя ТКИ	Рекомендации по повышению уровня ТКИ	Показатели ТКИ откорректированной конструкции детали				Оценка ТКИ по откорректированным параметрам
		П _т	П _т *	q	qП _т *	
Цена материала, руб	Заменить медь М1 на сталь 08КП или 10КП	от 200 до 400	2	0,18	0,36	СТ
Общая форма детали	По условиям функционирования не изменяется	многоступенчатая	1	0,03	0,03	НГ
Относительное количество стандартизированных, унифицированных и повторного применения конструктивных элементов	Не изменяется	0	1	0,03	0,03	НГ
Относительная высота детали, %	Повысить критические значения параметров за счет приращения способа обратной вытяжки с подпором кромки	1,42	2	0,03	0,06	СТ
Относительная толщина стенки детали, %	Увеличить толщину стенки до 1,2 мм*	0,75	1	0,03	0,03	НГ
Относительный радиус сопряжения 3 и 4	Увеличить радиус сопряжения	10,0	3	0,03	0,09	ВТ
Относительный радиус сопряжения 2-3	Увеличить радиус сопряжения	20,0	2	0,03	0,06	СТ
Относительный радиус сопряжения 1-2	Увеличить радиус сопряжения	10,0	3	0,03	0,09	ВТ
Наличие и назначение покрытия	Не изменяется	покрытие защитно-декоративное	1	0,02	0,02	НГ

* Увеличение толщины необходимо для сохранения массы детали и повышения устойчивости кромки при ее подпоре.



4.2. Показатели технологичности листовых штампованных деталей

Эксплуатационно-технические требования к листовым штампованным деталям:

- 1) полное соответствие конструкции назначению и условиям эксплуатации детали;
- 2) обеспечение требуемой прочности и жесткости при минимальном расходе металла;
- 3) обеспечение необходимой точности и взаимозаменяемости;
- 4) соответствие специальным физическим, химическим или техническим условиям.

Основные показатели технологичности листовых холодноштампованных деталей:

- 1) наименьший расход материала;
- 2) наименьшее количество и низкая трудоемкость операций;
- 3) отсутствие последующей механической обработки;
- 4) наименьшее количество требуемого оборудования и производственных площадей;
- 5) наименьшее количество оснастки при сокращении затрат и сроков подготовки производства;
- 6) увеличение производительности отдельных операций и цеха в целом.

Общим результативным показателем технологичности является наименьшая себестоимость штампуемых деталей. Понятие технологичности неразрывно связано с серийностью производства, от которой зависят величина и соотношение элементов себестоимости изделий (материал, заработная плата, цеховые расходы). Технологичная конструкция в условиях мелкосерийного производства может оказаться нетехнологичной в массовом производстве, и наоборот.

В большинстве случаев основным критерием технологичности конструкции является наиболее экономное расходование материала при наименьшем количестве операций и снижении трудоемкости.

Общая экономичность процессов холодной штамповки не только не снижает, но еще больше повышает значение экономии металла. Анализ себестоимости штампованных деталей показывает, что экономия материала на 10% по эффективности равноценна увеличению производительности в три раза на всех операциях. Экономия материала на 20...25% в большинстве случаев настолько эффективна, что стоимость сэкономленного материала обычно превышает сумму прямой заработной платы.



Общие технологические требования к конструкции листовых штампованных деталей:

1. Механические свойства листового материала должны соответствовать не только требованиям прочности и жесткости изделия, но также процессу формоизменения и характеру пластических деформаций.

2. Необходимо учитывать возможность применения для формоизменяющих операций более пластичного, хотя и менее прочного металла, так как в процессе холодной штамповки происходит его наклеп, значительно увеличивающий характеристики прочности материала.

3. При расчете на прочность не следует завышать толщину листового металла, учитывая упрочнение его в процессе холодной деформации и достаточно высокую жесткость штампованных деталей.

4. Необходимо стремиться к созданию легких и облегченных конструкций деталей, применяя для увеличения жесткости штамповку ребер жесткости, отбортовку, загибку фланцев, закатку кромок и т. п., а также замену тяжелых стандартных прокатных профилей более легкими – гнутыми или свернутыми профилями из листового металла.

5. Конфигурация детали или ее развертки должна обеспечивать наиболее выгодное использование листового материала, давая возможность применить малоотходный или безотходный раскрой. Для получения безотходного раскроя не следует искусственно увеличивать размеры и площадь заготовки.

6. Если отход неизбежен, то желательно придать ему конфигурацию, соответствующую другой детали, или использовать его вторично.

7. Необходимо унифицировать и уменьшить ассортимент применяемых толщин и марок листового металла.

8. Следует соблюдать кратность размеров крупных штучных заготовок размерам листа, иначе отходы значительно увеличиваются.

9. Следует широко применять технологичные штамповочные конструкции взамен литых, кованных или клепаных изделий.

10. Необходимо стремиться к уменьшению количества отдельных деталей, заменяя их цельноштампованными, что обычно приводит к упрощению технологического процесса и экономии материала. Исключением являются случаи, когда в результате указанной замены получается деталь настолько сложной конфигурации, что она требует повышенного расхода материала, является громоздкой или нетехнологичной.

11. Следует широко применять штамповочные методы для сборки отдельных деталей путем расклепки, отбортовки, полкой высадки, загибки кромок и лапок, закатки шва и т. п.



12. Допуски на размеры штампованных деталей должны соответствовать экономической точности операций холодной штамповки (11, 12 квалитеты). В случае необходимости повышенная точность деталей (8, 9 квалитеты) может быть получена введением дополнительных операций (зачистка, калибровка, правка).

При анализе технологичности плоских деталей учитывают размеры трудновыполнимых элементов и точность размеров.

Трудновыполнимыми элементами плоских деталей и заготовок являются малые отверстия и уступы, узкие пазы и выступы (рис. 4.2). Наименьшие значения размеров этих элементов для стальных деталей приведены в табл. 4.9.

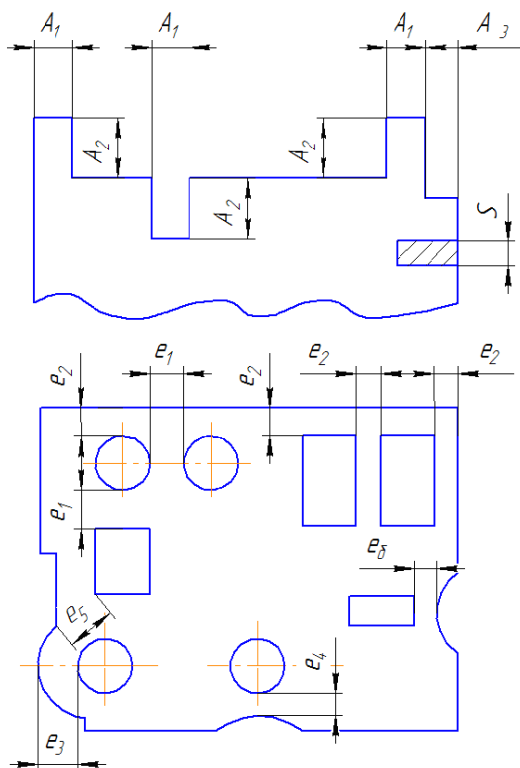


Рис. 4.2. Элементы деталей, размеры которых при штамповке ограничиваются



Наименьшие размеры перемычек между элементами плоской металлической детали приведены в табл. 4.10.

Штампы совмещенного действия применяют в тех случаях, когда наименьшее расстояние между наружным и внутренним контуром детали не меньше величин, указанных в табл. 4.11.

Т а б л и ц а 4.9

Наименьшие допустимые размеры элементов плоских деталей (рис. 4.2)

Сталь	A_1/S	A_2/S	A_3/S	Диаметр (размер) отверстия $/S$			
				круглое	квадратное	прямоугольное	овальное
Твёрдая ($\sigma_T > 700$ МПа)	1,5	1,5	1,2	1,5	1,4	1,2	1,1
Средней твёрдости ($700 \geq \sigma_T \geq 500$ МПа)	1,2	1,8	1,0	1,2	1,1	0,9	0,8
Мягкая ($\sigma_T < 500$ МПа)	1,0	2,0	0,8	1,0	0,9	0,7	0,6

Т а б л и ц а 4.10

Наименьшая допустимая величина перемычек в металлических деталях

Предел прочности металла σ_B , МПа	e_1/S	e_2/S	e_3/S	e_4/S	e_5/S	e_6/S	e_7/S
$\sigma_B \leq 500$	1,2	1,4	1,5	1,2	1,5	1,3	1,6
$\sigma_B > 500$	1,0	1,2	1,2	1,0	1,2	1,1	1,3

Т а б л и ц а 4.11

Наименьшая допустимая величина перемычки между наружным и внутренним контурами плоской детали при совмещенной штамповке

Толщина (величина), мм					
материала	перемычки	материала	перемычки	материала	перемычки
0,4	1,6	2,0	5,3	3,6	9,0
0,6	2,0	2,2	5,8	3,8	9,5
0,8	2,5	2,4	6,3	4,0	10,0
1,0	3,0	2,6	6,7	4,2	10,5
1,2	3,5	2,8	7,2	4,4	11,2
1,4	3,9	3,0	7,6	4,6	11,8
1,6	4,4	3,2	8,0	4,8	12,4
1,8	4,9	3,4	8,5	5,0	13,0



Когда размеры соответствующих элементов детали не меньше указанных в табл. 4.9 – 4.11, то можно применять однооперационные, последовательные или совмещенные штампы. Если не выполняются требования только табл. 4.11, то можно применять штампы первых двух типов. Если не выполняются для всех или только отдельных элементов плоской детали требования табл. 4.9, 4.10, то отверстия и уступы изготавливают другими способами, а штампуют только заготовку с припусками и напусками на последующую обработку, которая соответствует требованиям табл. 4.9, 4.10. Наименьшее расстояние между отверстиями при одновременной их пробивке должно быть равно $b = (2 \dots 3)S$.

При анализе технологичности учитывают требуемую точность размеров детали. Достижимая точность размеров плоской детали зависит от типа и точности штампа, толщины и свойств материала, способов фиксации заготовки в штампе. Достижимая точность в зависимости от указанных условий приведена в справочной литературе. Сравнивая требуемую точность с достижимой, выбирают условия штамповки. Если точность отдельных или всех размеров превышает достижимую при обычной штамповке, то выбирают чистовую штамповку или предусматривают последующую зачистку или механическую обработку поверхностей разделения. В этом случае штампуют заготовку с соответствующими припусками на последующую обработку тех элементов, точность которых не гарантируется штамповкой. Если предъявляются повышенные требования к плоскостности детали, то предусматривается правка детали.

При анализе технологичности гнутых деталей выясняют, требуется ли калибровка радиусов, последовательность гибки и пробивки отверстий, рациональное расположение линиигиба относительно направления волокон металла и выбирают способ гибки, обеспечивающий требуемую точность.

Наименьшая высота отгибаемой полки должна быть $h \geq 3s$. Наименьший допустимый радиус гибки, обеспечивающий получение детали без трещин, зависит от пластичности металла, качества поверхности заготовки, расположения линиигиба относительно волокон, расположения заусенцев относительно матрицы.

В зависимости от указанных факторов для каждой марки материала получены минимальные радиусы гибки в долях от толщины при расположении линиигиба вдоль волокон $[r/s]^B$ и поперек $[r/s]^H$.

Если требуемый относительный радиус гибки $r/s \geq [r/s]^B$, то калибровка радиуса не требуется при любом расположении заготовки



на листе. Если $[r/s]^n < r/s < [r/s]^B$, то калибровка не требуется при поперечном расположении линиигиба относительно волокон. Если $r/s < [r/s]^n$, то калибровка необходима во всех случаях.

Когда калибровка необходима, то гибкой получают полуфабрикат, радиус которого не меньше допустимого при расположении линиигиба вдоль волокон. Допустимый радиусгибки можно уменьшить, если предусмотреть отжиг заготовки, зачистку заусенцев перед гибкой.

Минимально допустимые радиусыгибки следует применять лишь при конструктивной необходимости. В большинстве случаев можно применить увеличенные радиусыгибки $r > s$, а для толстых заготовок – еще бóльшие. В случаегибки пластичных металлов (стали 10, 20) с малым радиусом закругления ($r \geq 0,5s$) линию изгибажелательно располагать поперек волокон проката. При гибке тех же металлов с радиусом $r > s$ расположение линии изгиба безразлично: решающее значение при этом имеет достижение наиболее выгодного раскрыя металла. При гибке твердых и малопластичных металлов (бронза, сильно наклепанная латунь, лента пружинной стали и др.) линию изгиба следует располагать обязательно поперек волокон проката. Наименьший радиус изгиба берется в пределах от $2s$ до $4s$.

В случае изгиба заготовки в разных направлениях, а также при изготовлении правых и левых деталей из одной заготовки радиус закругления одного из перегибов должен быть увеличен. Гибка должна быть произведена таким образом, чтобы сторона с заусенцами пришлась на наружную сторону перегиба с увеличенным радиусом. Если в полках гнутой детали есть отверстие, то его изготавливают перед гибкой в случае, когда расстояние от наружной поверхности детали до кромки отверстия $l_1 > (s + 1,1r)$. В противном случае его изготавливают послегибки.

Способгибки (гибка без прижима, с прижимом, с фиксацией заготовки штифтами на прижиме, в шарнирной матрице) выбирают по точности размеров, которые обеспечиваются гибкой. Ориентировочные данные о достижимой точностигибки без прижима приведены в справочной литературе. Точностьгибки с прижимом примерно в два раза, а с фиксацией штифтами на прижиме – в четыре раза выше, чем без прижима. Сопоставляя требуемую и достижимую точность размеров, выбирают способгибки. Если требуемая точность выше достижимой, то последнюю обеспечивают последующей механообработкой штампованных полуфабрикатов, размеры которых определяют с учетом припусков на обработку.



Для увеличения жесткости гнутых деталей и устранения упругого пружинения рекомендуется штамповка ребер жесткости поперек угла изгиба.

Если конструкция сборочного узла требует прилегания боковых полок и основания изогнутой скобы (с внутренней стороны) к другим деталям, вместо гибки под острым углом рекомендуется делать гибку с поднутренным закруглением в углах.

При гибке деталей, имеющих широкую и узкую части, радиус изгиба не должен захватывать широкую часть, иначе образуются наплывы. Если по конструктивным соображениям линия изгиба проходит в месте сопряжения этих частей, следует применять вырезы шириной $b \geq s$.

В случае многооперационной гибки необходимо предусматривать технологические базы для фиксирования заготовок на операциях.

При анализе технологичности деталей, получаемых вытяжкой, необходимо, по возможности, избегать сложных и несимметричных форм вытягиваемых деталей, прибегая к ним лишь в случае явной конструктивной необходимости.

Выясняют, требуется ли обрезка и калибровка после вытяжки, допустимо ли расположение отверстий в дне и фланце детали. При штамповке полых цилиндрических и фигурных деталей без фланца обрезка необязательна при однопереходной вытяжке, когда допуск на высоту не меньше достижимых значений. Если требуемая точность высоты выше достижимой, то предусматривают обрезку и назначают припуск на нее. При штамповке полых деталей с фланцем размер фланца обеспечивают обрезкой и назначают соответствующий припуск.

Достижимая точность высоты полых деталей с фланцем приведена в справочной литературе. Если требуется большая точность высоты, то предусматривается калибровка в штампе. Деталь обжимается в штампе по всем поверхностям.

Достижимая точность размеров сечения при вытяжке цилиндрических и коробчатых деталей приведена в справочной литературе. Если требуется более высокая точность, то применяют калибровку вертикальных стенок. В этом случае вытяжку в последнем, калибровочном, переходе ведут с уменьшенными зазорами между матрицей и пуансоном и малой деформацией. Достижимая точность размеров сечения после калибровки приведена в справочниках.

Наименьшие допустимые радиусы сопряжения элементов полых деталей, изготавливаемых вытяжкой, приведены в справочной литературе. Если соответствующие радиусы детали меньше допустимых, то



требуется калибровка, которая выполняется в специальном штампе. В последнем переходе вытяжки принимают радиусы, которые не меньше допустимых при необходимых коэффициентах вытяжки. Выбрав радиусы сопряжения в последнем переходе вытяжки, определяют размеры полуфабриката перед калибровкой, используя условия постоянства площади срединной поверхности.

Радиусы закруглений у фланца должны быть, по возможности, больше, а радиусы закругления у дна могут быть взяты меньшими: $r > (2 \dots 4)s$. Сопряжение стенок с дном без радиуса закругления может быть выполнено путем дополнительной калибровки или при штамповке весьма толстых заготовок ($D/s \leq 20$ при $m > 0,7$).

Требования к размерам и расположению отверстий на деталях, изготавливаемых вытяжкой, такие же, как и при штамповке плоских деталей (см. табл. 4.9–4.11). Отверстия в дне детали и на фланце располагают на плоской части этих элементов. Необходимо избегать глубоких вытяжек с широким фланцем ($D > 3d$ при $h \geq 2d$), требующих большого количества операций.

Полуоткрытые несимметричные формы полых деталей нужно проектировать, учитывая возможность спаренной вытяжки с последующей разрезкой на две детали. В прямоугольных коробках следует избегать острых углов в плане и у дна детали, кроме случаев изготовления коробок методом холодного выдавливания. При вытяжке полых деталей сложной конфигурации необходимо предусматривать те или иные технологические базы для фиксации заготовок на операциях.

Библиографический список

1. *Аверкиев, Ю.А.*, Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
2. *Беляев, В.А.* Холодная листовая штамповка: учебное пособие. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2008. 128 с.
3. *Бурдуковский, В.Г.* Технология листовой штамповки: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 224 с.
4. *Зубцов, М.Е.* Листовая штамповка: учебник для вузов. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.
5. *Ильин, Л.Н.*, Семенов И.Е. Технология листовой штамповки: учебник для вузов. М.: Дрофа, 2009. 475 с.
6. *Ковка и штамповка: справочник.* В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Пред. совета Е.И. Семенов. М.: Машиностроение, 2010. 731 с.
7. *Кункин, С.Н.*, Мамутов А.В, Мамутов В.С. Технологические методы листовой штамповки: учебное пособие. СПб.: СПбГПУ Петра Великого, 2018. 52 с.



8. *Матвеев, А.С.* Технологическое обеспечение процессов гидроштамповки трубных заготовок: учебное пособие. СПб.: Лань, 2017. 376 с.

9. *Нестеров, Н.И.* Основы проектирования технологических процессов холодной штамповки: учебное пособие. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2021. 147 с.

10. *Оценка* технологичности конструкций металлических заготовок и деталей, изготавливаемых штамповкой: методические указания к домашнему заданию, курсовому и дипломному проектированию / Сост. Н.П. Агеев; Лен. мех. ин-т, 1988. 59 с.

11. *Попов, Е.А.*, Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 480 с.

12. *Романовский, В.П.* Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 726 с.

13. *Справочник* конструктора штампов: листовая штамповка / Под общ. ред. Л.И. Рудмана. М.: Машиностроение, 1988. 496 с.

14. *Технологические* процессы изготовления деталей летательных аппаратов листовой штамповкой: учебное пособие / В.Н. Самохвалов [и др.]. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2017. 80 с.

15. *Технология* листовой штамповки: учебное пособие / В.И. Бер, С.Б. Сидельников, Р.Е. Соколов, Е.В. Иванов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 168 с.

16. *Штампы* для холодной штамповки: учебное пособие / Е.В. Затеруха, В.А. Лобов, Н.И. Нестеров, Д.С. Филин; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2021. 108 с.



О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
1.1. Классификация операций	4
1.2. Основные штампуемые материалы	11
1.3. Методы испытаний и определение механических и технологических свойств листовых материалов	18
2. РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ	23
2.1. Механизм разделения материала	23
2.2. Отрезка	27
2.3. Вырезка	34
2.4. Вырубка и пробивка	36
2.4.1. Раскрой материала	41
2.4.2. Чистовая вырубка и пробивка	44
2.4.3. Определение исполнительных размеров инструмента при вырубке и пробивке	50
2.4.4. Конструкции матриц и пуансонов	52
2.5. Зачистка	55
2.6. Надрезка и обрезка	60
3. ФОРМОИЗМЕНЯЮЩИЕ ОПЕРАЦИИ	63
3.1. Вытяжка без утонения	63
3.1.1. Вытяжка цилиндрических деталей	65
3.1.2. Вытяжка цилиндрических деталей с фланцем	79
3.1.3. Реверсивная вытяжка	80
3.1.4. Вытяжка деталей ступенчатой формы	82
3.1.5. Вытяжка деталей сферической, параболической и криволинейной форм	83
3.1.6. Вытяжка конических деталей	84
3.1.7. Многооперационная последовательная вытяжка в ленте	86
3.2. Вытяжка с утонением стенки	87
3.3. Обжим	93
3.3.1. Продольный обжим в конических матрицах	99
3.3.2. Продольный обжим в матрицах с криволинейной образующей	102
3.3.3. Критерии потери устойчивости заготовок при обжиге	104
3.4. Гибка	108
3.5. Отбортовка	119
3.5.1. Отбортовка отверстий (внутренняя)	119
3.5.2. Отбортовка наружного контура (внешняя)	127
3.6. Раздача	128
3.7. Формовка	135



4. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ.....	141
4.1. Методика оценки технологичности конструкции детали с использованием показателей и уровней технологичности.....	141
4.2. Показатели технологичности листовых штампованных деталей.....	158
<i>Библиографический список</i>	165

Нестеров Николай Иванович

Операции листовой штамповки

Редактор *Г.М. Звягина*

Корректор *Л.А. Петрова*

Компьютерная верстка: *С.В. Кашуба*

Подписано в печать 19.05.2022. Формат 60х84/16. Бумага документная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 9,8. Тираж 500 экз. Заказ № 74.

Издательство БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1

