

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А.Г. ШЛЯПУГИН, Ф.В. ГРЕЧНИКОВ, И.П. ПОПОВ, М.В. ХАРДИН

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ
ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ**

Учебное пособие

С А М А Р А
Издательство СГАУ
2010

УДК 621.73.681.3

Рецензенты: д-р техн. наук, Каргин В.Р..
к-т техн. наук, Смольников С.Д.

Шляпугин А.Г. , Гречников Ф.В. , Попов И.П. , Хардин М.В.

Разработка моделей формообразования листовых деталей летательных аппаратов с помощью современных программных средств: учеб. пособие / Шляпугин А.Г. , Гречников Ф.В. , Попов И.П. , Хардин М.В. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 66 с. : ил.

ISBN

Данное пособие ориентированно на студентов занимающихся научно-исследовательской работой в области листовой штамповки. В нем приведены основные методы изготовления листовых деталей летательных аппаратов и их двигателей. На примере использования программы DEFORM показаны приемы получения данных являющихся спецификой процессов вытяжки и обжима цилиндрической заготовки.

УДК 621.73.681.3

ISBN

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Методы изготовления листовых деталей	5
1.1 Механическая обработка	5
1.2 Ротационное выдавливание	6
1.3 Сварка из листового металла	7
1.4 Динамическое деформирование	8
1.5 Штамповка деформируемыми средами	11
1.6. Инструментальная штамповка	14
2. Исследование процесса вытяжки кольцевой заготовки с помощью программы DEFORM	43
2.1 Оценка длины образующей при вытяжке кольцевой заготовки	53
3. Исследование процесса обжима цилиндрической заготовки с помощью программы DEFORM	56
3.1 Изменение длины образующей при обжиме цилиндрической заготовки с отверстием	58
3.2 Влияние межоперационного отжига на обжим цилиндрической заготовки с отверстием	59
Заключение	62
Рекомендуемая литература	63

ВВЕДЕНИЕ

По данным, опубликованным Минэкономразвития, отставание России по производительности труда от Евросоюза и США в ряде отраслей достигает 30 раз //www.economy.gov.ru [1].

Так отечественная ракетно-космическая промышленность ежегодно производит продукции из расчета 14,8 тысячи долларов на одного работающего в отрасли, в то время как в ЕС этот показатель - 126,8 тысячи долларов, а в США - 493,5 тысячи долларов (выше в 33,3 раза).

Гражданское авиастроение РФ производит продукции на 20 тысяч долларов в год на работника, военное - в шесть раз производительнее - 120 тысяч долларов, но это все равно, значительно меньше, чем в США и ЕС (300 тысяч долларов).

Президент Российской Федерации назвал повышение производительности труда в РФ в разы одной из приоритетных задач на долгосрочную перспективу. Россия ставит перед собой цель войти к 2020 году в пятерку ведущих экономик мира. Чтобы быть конкурентоспособными на глобальном рынке, отечественные производители должны не только увеличивать инвестиции, но и развивать инновации и как минимум в два раза увеличить среднюю производительность труда //www.rian.ru [2].

Данная задача достижима при максимальном использовании имеющихся ресурсов, а также активном внедрении новых экономически оправданных технологий. В области авиа- и ракетостроения из-за того, что номенклатура изделий весьма обширна, следует уделять большее внимание универсальному оборудованию. А также изыскивать способы экономии средств, при производстве опираясь на научный прогресс, и использование альтернативных материалов и технологий.

Очевидно, что экономически оправданным применение обработки металлов давлением будет только в том случае, если внимание уделять всем аспектам производственной деятельности: изготовлению штамповой оснастки, эксплуатации оборудования, уменьшению количества отходов и

потерь материалов при производстве, применению более дешевых материалов для изготовления штамповой оснастки и пр.

Следует развивать эффективное применение вычислительной техники и современного программного обеспечения при проектировании технологического процесса, повышать квалификацию инженеров, способствовать освоению ими новых технологий проектирования и изготовления изделий.

Данное пособие ориентировано на студентов занимающихся научно-исследовательской работой в области листовой штамповки. В нем приведены основные методы изготовления листовых деталей летательных аппаратов и их двигателей. На примере использования программы DEFORM показаны приемы получения данных являющихся спецификой процессов вытяжки и обжима цилиндрической заготовки.

1. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Широкое применение в различных отраслях машиностроения, в том числе и аэрокосмической, нашли конические осесимметричные детали, для изготовления которых широко используются методы обработки металлов давлением.

Зачастую использование существующих технологических процессов приводит к неоправданно большим затратам средств на изготовление.

Существующее многообразие конических деталей изготавливается с помощью следующих основных технологических решений [3, 4]:

- механическая обработка,
- ротационная вытяжка,
- сварка из листового металла,
- динамическое деформирование,
- штамповка эластичной или пластичной средой,
- инструментальная штамповка.

1.1 Механическая обработка

Механическая обработка применяется, как правило, для изготовления небольших деталей с относительной толщиной стенки (отношение средней толщины детали к большему диаметру основания детали) больше 0,1, что в первую очередь объясняется широким распространением универсального токарного оборудования.

Отличительной особенностью механической обработки является низкий коэффициент использования материала (может быть меньше 5 %). В связи, с чем заготовку под механическую обработку получают с помощью других технологических решений (например, инструментальной штамповкой).

1.2 Ротационная вытяжка

Ротационное выдавливание (ротационная вытяжка) применяется в мелкосерийном производстве, в случае, когда изготовление штамповой оснастки экономически не выгодно, а также при изготовлении деталей с выпукло-вогнутой формой образующей, съем которых с пуансона затруднен.

Как правило поверхность деталей полученных ротационным выдавливанием является волнистой и соответствует 6-7 классу чистоты [3].

1.2. Ротационное выдавливание

Различают прямое и обратное ротационное выдавливание. В первом случае направление течения металла совпадает с направлением перемещения ролика, во-втором – не совпадает. Для изготовления конических деталей применяют прямое ротационное выдавливание.

За один переход возможно изготовление детали с отношением большего к меньшему диаметру 0,2 -0,3. Для получения деталей с большим отношением осуществляется несколько последовательных операций на разных оправках, но при одном и том же наименьшем диаметре оправки.

В ходе обработки металл детали значительно утоняется и наклепывается, чем при вытяжке на прессах, поэтому детали, выдавливаемые за несколько операций, обычно подвергают промежуточному отжигу.

Наряду с простотой оснастки, универсальностью давяльного инструмента и оборудования процесс ротационного выдавливания характеризуется невысокой (по отношению к инструментальной штамповке) производительностью и требует большого опыта и затраты больших физических усилий от рабочего. В случае изготовления деталей без ЧПУ для автоматизации процесса широкое применение нашли специальные приспособления (рисунок 1.1) [5] и станки с ЧПУ (рисунок 1.2).

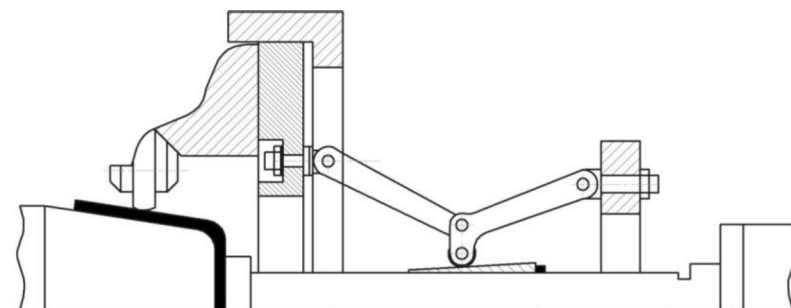


Рисунок 1.1 – Схема устройства для ротационной вытяжки с копиром в виде усеченного конуса смонтированного на осевом прижиме

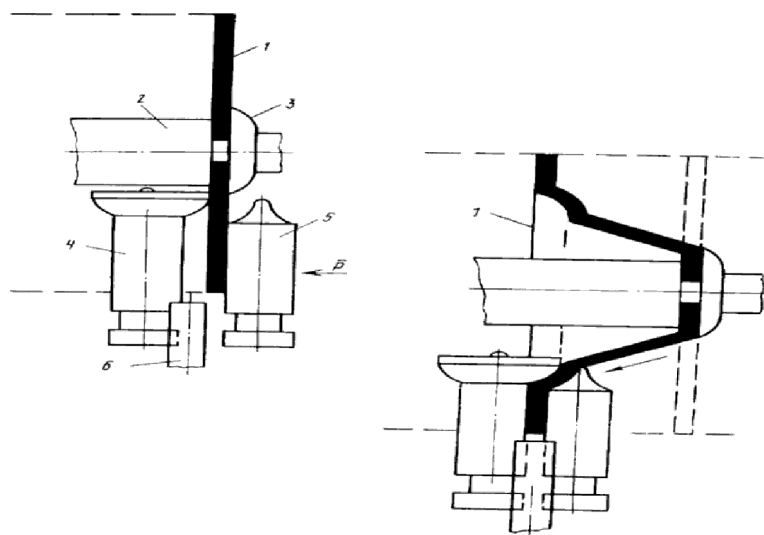


Рисунок 1.2 – Схема ротационного выдавливания полых деталей
на станке с ЧПУ

Изготовление конических деталей осуществляется на токарных станках с ЧПУ с помощью специализированного инструмента. При этом процесс изготовления занимает от 2 до 15 минут и осуществляется в несколько этапов.

1.3 Сварка из листового металла

Сваркой из листового металла можно получить простые по форме детали с прямолинейной образующей. Крупногабаритные детали с криволинейной образующей, как правило, получают за счет последующего формоизменения сварной заготовки, динамическим деформированием, не большие – штамповкой эластичной средой и инструментальной штамповкой [4].

Типовой технологический процесс в этом случае включает операции раскроя заготовки, раскатку на роликовой гибочной машине, сварку и калибровку (в случае изготовления деталей с криволинейной образующей – штамповку). Для повышения точности формы детали применяют термофиксацию.

Существенным недостатком изготовления деталей сваркой из листа является наличие сварного соединения с сильно отличающимися механическими свойствами. Недостатком технологического решения может

также является низкая производительность и сложность осуществления автоматизации сварки детали встык. В случае изготовления тонкостенных деталей также возникает проблема прожигания металла. Вместе с тем решение является универсальным и доступным.

1.4 Динамическое деформирование

Технологические решения на основе динамического деформирования подразумевают использование энергии взрыва, магнитно-импульсную штамповку и электрогидроштамповку.

Различают несколько видов штамповки в зависимости от типа взрывчатого вещества (рисунок 1.3). Штамповка с применением:

- бризантного взрывчатого вещества (контактная и безконтактная),
- с применением пороховых зарядов,
- газовых смесей или сжиженных газов.

При бесконтактной взрывной штамповке заряд с заготовкой и матрицей погружается в специальную емкость с жидкостью (рисунок. 1.3,а).

Между заготовкой и полостью матрицы создается вакуум. Заряд размещается на некотором расстоянии от поверхности заготовки. При его подрыве возникает импульс давления высокой интенсивности, который распространяется в жидкости со скоростью 1450 м/сек. В результате в районе расположения заряда образуется газовый пузырь, который, пульсируя (расширяясь и сжимаясь), вызывает дополнительные импульсы давления, величина которых меньше основного импульса давления. В ходе колебаний пузырь перемещается к поверхности жидкости, а оставшаяся энергия вместе с частью жидкости выплескивается в атмосферу.

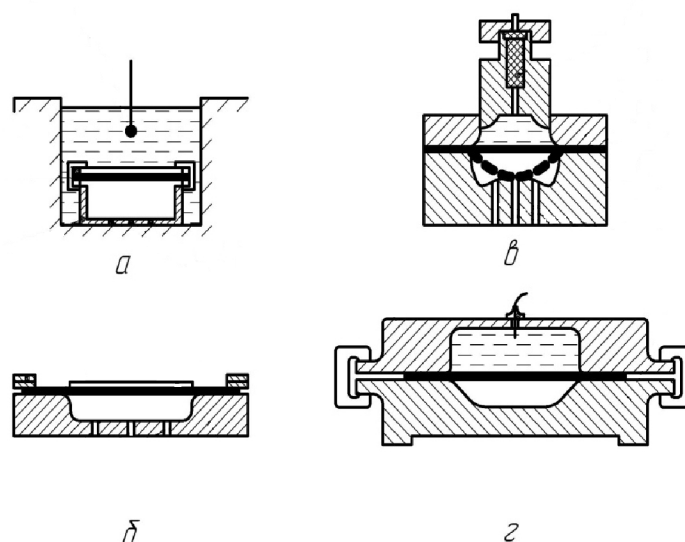


Рисунок 1.3 – Схема процесса взрывной штамповки

Примерно 60% выделившейся энергии приходится на основной импульс давления, 25% - на первые колебания газового пузыря и остальные 1-5% - на последующие. Энергия, преобразуемая в механическую работу деформации, зависит от взаиморасположения заготовки, заряда и поверхности жидкости, так как газовый пузырь для каждого заряда имеет вполне определенные размеры. Для получения взрывной волны нужной формы часто заряд, необходимый для деформирования заготовки, разбивают на отдельные части, располагая их так, чтобы можно было получить наибольший эффект. Глубина погружения заряда должна быть больше максимального радиуса газового пузыря, который соответствует первому периоду колебаний. Для бесконтактной взрывной штамповки используют тринитротолуол, тетрил, пентолит, динамиты и жидкие взрывчатые вещества.

Как правило, штамповку производят в открытых емкостях - естественных (озеро, река) или искусственных (железобетонных и земляных бассейнах). Иногда используются закрытые емкости и бассейны одноразового действия. В последнем случае стенки бассейнов при взрыве либо полностью разрушаются, либо откидываются (стенки крепятся легкосъёмными элементами и гибкими связями).

При контактных операциях взрывной штамповки (рисунок 1.3, б) заряд расположен непосредственно на заготовке.

Штамповка порохами и газами осуществляется в закрытых емкостях. Энергия взрывчатого вещества передается заготовке либо непосредственно, либо через промежуточную среду. На рисунке 1.3 представлены схемы деформирования заготовки с помощью энергии пороха (рисунок 1.3,в) и газовой смеси (рисунок 1.3,г).

Важными преимуществами штамповки газовыми смесями является равномерность нагружения поверхности заготовки при взрыве, возможность автоматизации процесса. Существенным недостатком штамповки газовыми смесями является повышенные требования к технике безопасности.

Сущность процесса штамповки импульсным магнитным полем (ИМП) заключается в следующем. При импульсном разряде электрического тока высокого потенциала на катушку в ней образуется мощное магнитное поле, которое, распространяясь, встречает на своем пути заготовку. Возникающие на поверхности заготовки вихревые токи образуют свое магнитное поле, которое, взаимодействуя с первичным полем, вызывает эффект «отталкивания» заготовки от витков катушки. Если на пути движения заготовки установить матрицу или оправку, то заготовка соответствующим образом будет деформироваться [7].

Существует и другая схема создания формирующей силы, когда через катушку-индуктор и заготовку пропускают противоположные токи обратной полярности. Однако в этом случае сложно осуществить надежный контакт между заготовкой и оправкой, нарушение которого приводит к возникновению дуги разряда.

Вытяжка деталей с помощью ИМП по схеме напряженно-деформированного состояния представляет собой штамповку заготовок эластичным пуансоном по жесткой матрице. В данном случае можно создать вполне определенное неравномерное силовое поле, в результате чего достигаются в заготовке различные степени деформации, отличные от

обычной схемы. Например, в центре заготовки, где обычно наблюдается большое утонение, можно создать «провал» напряженности магнитного поля, т.е. усилие деформирования в этом районе заготовки будет значительно меньше, чем в других, что очень важно для повышения предельных степеней деформации. Неравномерность магнитного поля достигается путем разработки индукторов с неравномерным распределением витков или применения обычных, универсальных индукторов с концентраторами поля. Концентраторы представляют собой металлические вставки различной формы, изготовленные из материала с хорошими электрическими свойствами (например, из сплава меди с бериллием). Их принцип работы основан на использовании эффекта увеличения плотности тока, а, следовательно, и напряженности магнитного поля, на участках концентратора, наиболее близко расположенных к поверхности заготовки.

Применяя описываемый способ, можно штамповать малопластичные и высокопрочные материалы, а также достигать более высоких степеней деформации за один переход и точности выполнения контуров деталей. Другими достоинствами являются универсальность оборудования, минимальное время на переналадку, простота оснастки по конструкции. Сравнительная безопасность процесса позволяет производить разнообразную расстановку оборудования на участке, непосредственно в цехе, легко осуществлять механизацию и автоматизацию процесса.

Вместе с этим деформирование ИМП имеет и свои недостатки: зависимость силы электромагнитного воздействия от электропроводности материала заготовки затрудняет штамповку относительно плохопроводящих материалов, а сложность реализации больших запасов энергии ограничивает возможность деформирования заготовок больших габаритов.

1.5. Штамповка деформируемыми средами

При штамповке деталей пластичной средой (свинец, олово, алюминий и др.) пуансон и складкодержатель являются универсальными, а меняется только матрица. В качестве пластичной среды применение нашли следующие

металлы: свинец, олово, алюминий. Применяя данный метод, можно производить резку, формовку, гибку и вытяжку. Особый интерес этот метод представляет для операции глубокой вытяжки деталей сложной формы, например ожевальной. Процесс вытяжки пластичным металлом производится по схеме, представленной на рисунке 1.5.

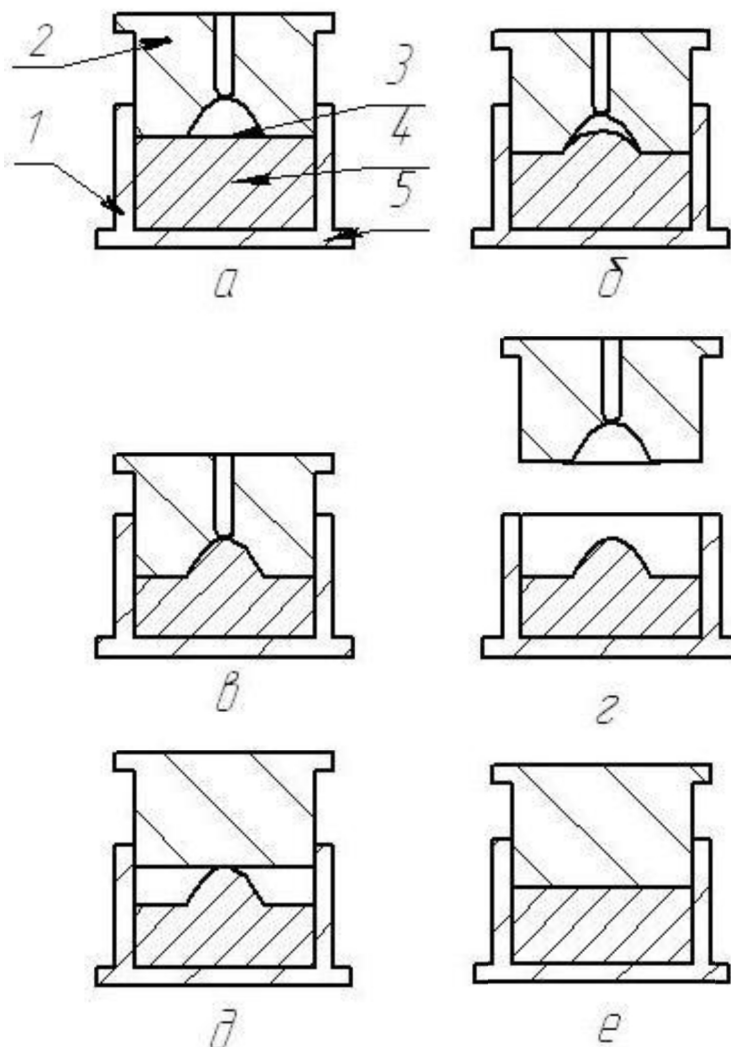


Рисунок 1.5 – Схема процесса вытяжки металла пластичным пуансоном

Универсальный штамп для вытяжки полых деталей пластичным металлом состоит из трех основных частей: корпуса, или контейнера 1, сменной матрицы 2 и обжимной плиты 6. Корпус 1 заполняется расплавленным свинцом (или другим пластичным металлом) до уровня, при котором возможна фиксация матрицы. После того как пластичный металл

застыл, корпус устанавливается на стол пресса. Заготовка 3 укладывается на пластичный металл 4, на заготовку ставится матрица 2. Положение матрицы фиксируется цилиндрической поверхностью корпуса 1, не залитой пластичным металлом. Матрица 2 прижимает заготовку к пластичному металлу (рисунок 1.5, а), который при рабочем ходе пресса выдавливается в форму матрицы 2. Вместе с ним свертывается и заготовка 3. В этом случае центральная часть пластичного металла, выдавливаемая в рабочую часть матрицы, имеющую форму детали, играет роль универсального пуансона, а периферийная часть пластичного металла роль складкодержателя.

На рисунке 1.5 б, в показано начало и окончание процесса вытяжки полый конической детали методом штамповки пластичным металлом в универсальном контейнере.

По окончании вытяжки ползун пресса перемещается в верхнее положение вместе с закрепленной к нему матрицей 2. Полученная деталь съемником выталкивается из матрицы и удаляется из полости штампа пинцетом (рисунок 1.5, г). Деформируемый металл, принявший форму матрицы (рисунок 1.5, д, г) в таком виде не готов к штамповке последующей детали. Для того чтобы произвести штамповку следующей детали, необходимо придать пластичному металлу первоначальное положение (рисунок 1.5,а). Для этого в контейнер 1 вставляется обжимная плита 6, положение которой фиксируется цилиндрической поверхностью корпуса. При давлении ползуна на плиту пластичный металл обжимается, и штамп подготавливается к последующей вытяжке. Технологическая возможность этого процесса при формообразовании сложных полых деталей (конических, сферических, параболических, прямоугольных и др.) значительно шире, чем при вытяжке в инструментальных вытяжных штампах, а также в штампах с использованием резины и жидкости.

При штамповке-вытяжке пластичным металлом развиваются очень высокие удельные давления на заготовку (1000—1500 кг/см²). Это происходит по той причине, что для осуществления вытяжки детали

необходимо пластически деформировать не только заготовку, но и сам пластичный металл, на что затрачиваются значительные усилия. С одной стороны, это обстоятельство положительно, так как большие удельные давления на заготовку являются благоприятными для формообразования, особенно при деформировании высокопрочных материалов. Высокое удельное давление предупреждает складкообразование, блокирует в продолжение всего процесса вытяжки опасное сечение и тем создает благоприятную схему напряженно-деформированного состояния. В результате можно получать глубокие и сложные по форме детали. С другой стороны, мощность потребного оборудования при удельных давлениях 1000—1500 кг/см² и достаточно больших площадях зеркала контейнера оказывается очень высокой. Это является существенным недостатком данного процесса.

Способ вытяжки деталей пластичным металлом может быть применен для изготовления с нагревом деталей из таких труднодеформируемых материалов, как сплавы на основе титана, молибдена и др., которые при комнатной температуре практически не деформируются. При такой штамповке заготовка устанавливается на нагретую матрицу, в результате чего заготовка, а также пластичный металл деформируются и приобретают форму матрицы. В качестве пластичного металла в этом случае может быть использован алюминиевый сплав Д16.

1.6. Инструментальная штамповка

Из всех способов листовой штамповки на штамповку в инструментальных штампах приходится около 90% от общего объема производства. Поэтому рассмотрение вопроса изготовления конических деталей требует особого внимания.

Изготовление конических деталей возможно за счет использования следующих схем листовой штамповки: обжима, раздачи и одновременного обжима-раздачи трубной заготовки; многопереходной вытяжки с

последующей калибровкой и удалением материала в донной части; вытяжкой и последующим обжимом.

Наиболее простой способ – обжим трубной заготовки. Данный способ является хорошо изученным, и обладает следующими особенностями:

- не всегда диаметр большего основания изделия соответствует диаметру исходной заготовки, что требует предварительного обжима или раздачи заготовки на данный диаметр (в частности, если заготовка выполнена по ГОСТ);

- низкая предельная степень формоизменения за один переход; при обжиге коэффициент обжима обычно не превышает 1,3, в то время как для изготовления ряда изделий необходимо осуществить обжим с коэффициентом 2,5, то есть для изготовления детали требуется 5-6 переходов;

- получаемое изделие обладает характерным распределением толщин (наибольшая толщина находится у меньшего основания детали) (рисунок 1.6).

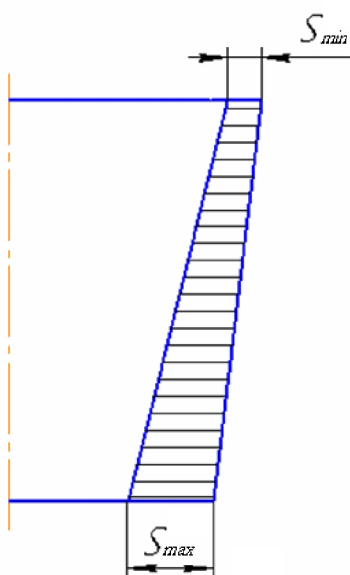


Рисунок 1.6 – Распределение толщин у детали полученной обжимом трубной заготовки

Наибольшей по абсолютной величине является сжимающая деформация ε_θ . При обжиге толщина заготовки увеличивается, но так как напряжение σ_ρ уменьшается с приближением к краю заготовки, а тангенциальная деформация, наоборот, - увеличивается, то наибольшее значение толщины у детали может быть не у края обжатой части заготовки, а на некотором удалении от нее. Совместное решение уравнения равновесия с условием пластичности:

$$\sigma_\theta = -\sigma_s \quad (1.3)$$

позволяет получить значение распределения напряжений по очагу деформации:

$$\sigma_{\rho \max} = -\sigma_s \left(1 + \mu \operatorname{tg} \gamma\right) \left(1 - \frac{r_{om}}{R_o}\right) (3 - 2 \cos \gamma) \quad (1.4)$$

Степень формоизменения в ходе процесса ограничивается потерей устойчивости в необжатой части заготовки в виде кольцевой складки или чередующихся продольных вмятин и выпуклостей с нарушением осевой симметрии заготовки.

Для большинства схем обжима при использовании заготовки с отношением $\frac{S_0}{d_0} > 0,02$, степенью деформации до 50%, при допущении, что металл изотропен, наибольшая толщина стенки располагается вблизи обжимаемой кромки заготовки и может быть рассчитана из условия линейной схемы напряженного состояния согласно [9,10] по формуле:

$$S_{\text{мод}} = S_0 \sqrt{\frac{D_0}{d_0}} = S_0 \sqrt{K_{об}}, \quad (1.5)$$

откуда

$$K_{об} = \frac{S_{мод}^2}{S_0^2} \quad (1.6)$$

В случае если степень деформации обжимаемого участка больше 50%, сечение заготовки с наибольшей толщиной стенки удаляется от кромки. Для расчёта наибольшей толщины стенки в этом случае согласно [12] может быть использована следующая формула:

$$S = S_0 \sqrt{\frac{D_0}{2e^{\cos\gamma}}} \quad (1.7)$$

Изготовление указанных деталей возможно с помощью раздачи (раздачи на сжатие) [10 и др.]. При осуществлении раздачи также считается, что схема напряженного состояния плоская, напряжение σ_θ растягивающее, σ_ρ сжимающее, а уравнение пластичности обычно записывается в виде [8,11 и др.]:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = \sigma_s \quad (1.8)$$

При раздаче наименьшая толщина стенки полученного изделия будет находиться вблизи кромки раздаваемого участка и может быть рассчитана из условия линейного напряженного состояния на кромке заготовки в ходе деформирования [9,12,25].

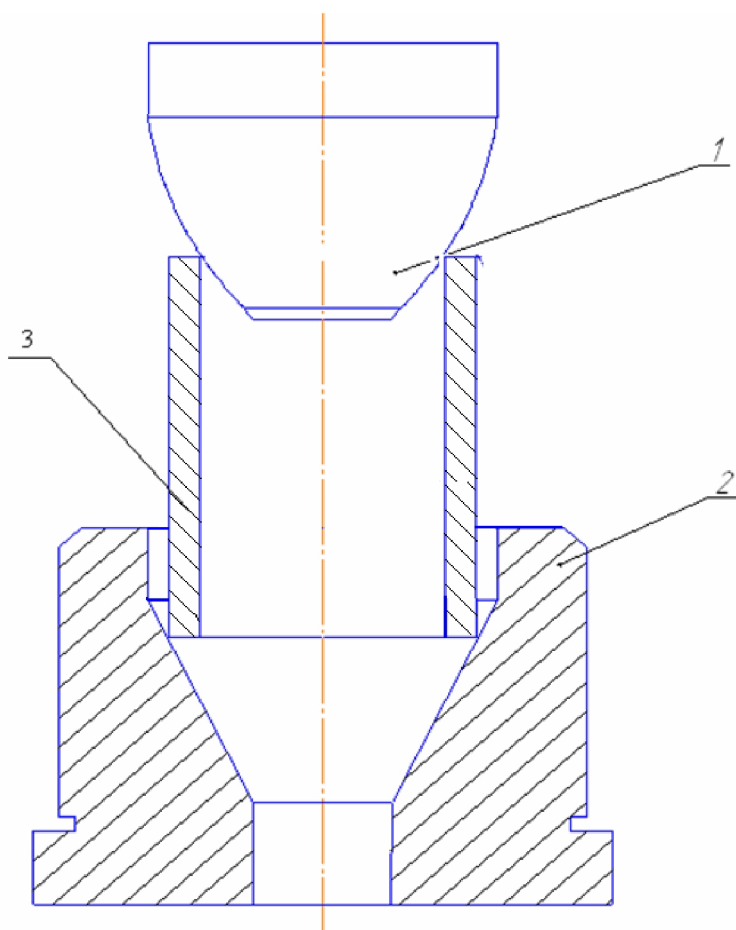
$$S_{бод} = S_0 \sqrt{\frac{d_0}{D_0}} = S_0 \sqrt{\frac{1}{K_{раз}}} \quad (1.9)$$

откуда:

$$K_{раз} = \left(\frac{S_0}{S_{бод}} \right)^2 \quad (1.10)$$

При производстве конических деталей широкое распространение нашел совмещенный способ одновременного обжима с раздачей, показанный на рисунке 1.7 [12,14-16,41 и др.].

Особенностью совмещенного процесса обжима-раздачи является наличие двух участков пластической деформации, разделённых между собой упругодеформируемым участком заготовки. На одном из участков пластической деформации осуществляется увеличение диаметра заготовки, т.е. раздача, на другом – уменьшение диаметра заготовки, т.е. обжим, причём при одинаковых условиях на обоих участках согласно [12] деформирование на участке раздачи осуществляется более интенсивно, чем на участке обжима.



1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка

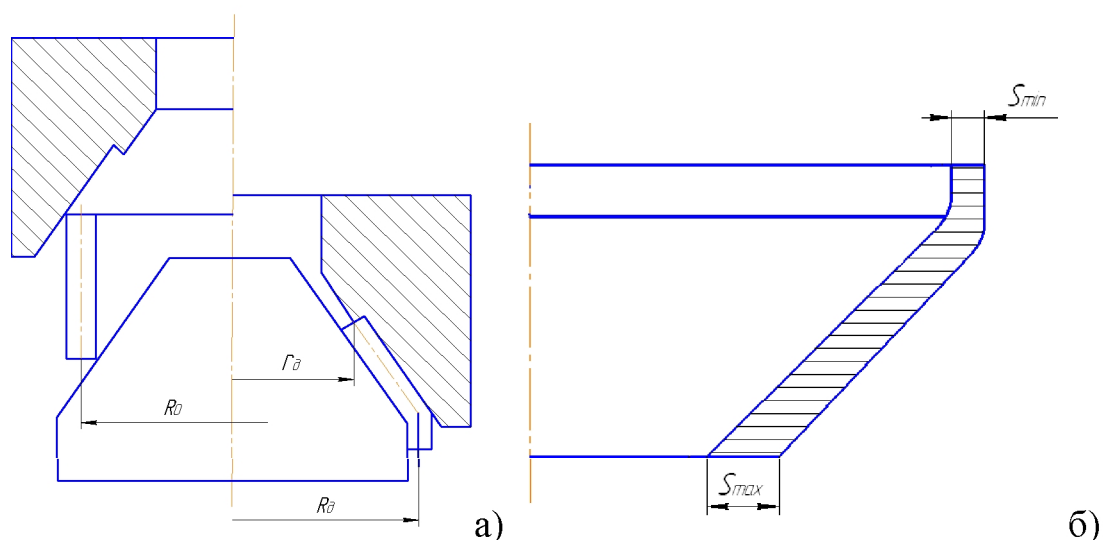
Рисунок 1.7 – Схема одновременного обжима-раздачи

Совмещение обжима с раздачей позволяет повысить коэффициент формоизменения заготовки за один переход, который в данном случае рассчитывается по формуле:

$$K = K_{раз} K_{об} = \frac{D_o}{d_o} . \quad (1.11)$$

В соответствии со способом, предложенным Евсюковым С.А., трубную заготовку устанавливают на пуансон и деформируют матрицей (рисунок 1.7). При этом одновременно протекают две операции: обжим и раздача. После того, как торец заготовки упрётся в упорный бурт на матрице, обжим прекращается. Возникающие на торце заготовки меридионально направленные напряжения и вызывают осуществление только операции раздачи до получения окончательного изделия.

На рисунке 1.8(б) показана схема способа и распределение толщин, получаемое при реализации данного способа.



а – схема получения изделия с ограничением деформирования по обжиму; б – распределения толщин у детали

Рисунок 1.8 – Схема способа [13]

Аналогичным образом реализуются и другие способы, предложенные Евсюковым С.А. [13-15], только упор устанавливается на участке заготовки с большим диаметром (участок раздачи).

Можно выделить способ изготовления конических деталей, предложенный М.З.Фоминым [16]. Способ реализуется в два перехода: на первом осуществляется предварительное обжатие заготовки, на втором – получение цилиндрического участка детали (рисунок 1.9).

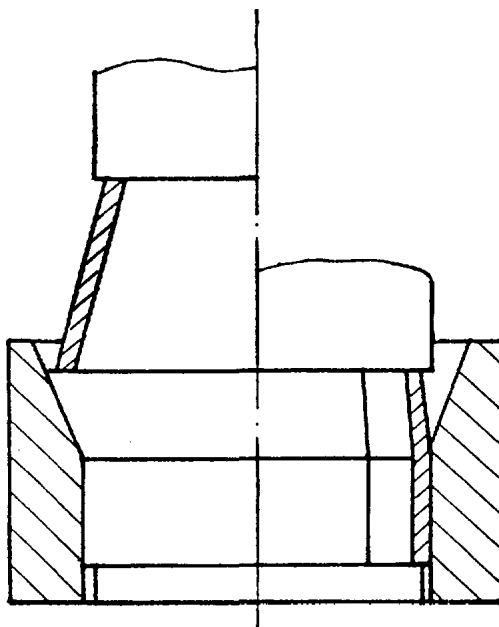


Рисунок 1.9 – Схема второго перехода способа [16]

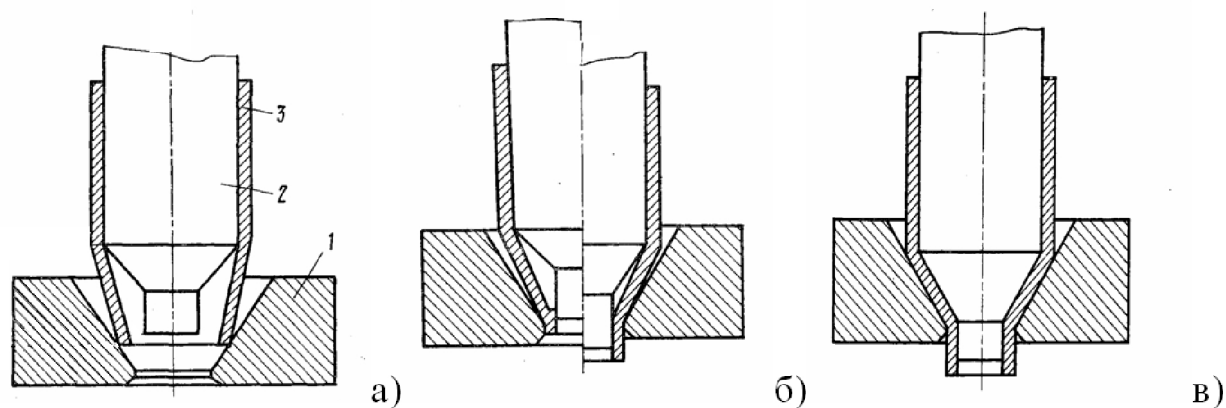
Для реализации двух переходов при обжиме может использоваться способ, предложенный Соколовским В.И. и др. [17]. Отличительной особенностью способа является ступенчатая форма пуансона (рисунок 1.9).

Аналогичные способы обжима можно встретить в работах [5-8,9,10,18,19,20 и др.].

Серьезным недостатком совмещенного способа обжима-раздачи трубной заготовки является несоответствие получаемого характера распределения толщин с распределением толщин у рассматриваемой группы деталей (см.

рисунок 1.7). В работе [21] показано, что суммарный коэффициент формоизменения при обжиге-раздаче может быть рассчитан по зависимости:

$$K = \left(\frac{S_{\text{мод}}}{S_{\text{бод}}} \right)^2 \quad (1.12)$$



а – положение детали перед началом окончательного обжима: 1– матрица,

2 – пуансон, 3 – предварительно обжатая заготовка; б – начальная и текущая стадии процесса деформирования; в – конечное положение детали в штампе

Рисунок 1.10 – Схема второго перехода способа [17]

Полученная формула позволяет примерно оценить соотношения наибольшей и наименьшей толщины стенки детали, полученной совмещенным процессом обжима-раздачи трубной заготовки.

Если принять, что отклонение наибольшего от наименьшего значения толщины детали не должно составлять более 20%, а наименьшая толщина кромки равна единице, то отношение наибольшей толщины детали к наименьшей должно быть менее чем 1,44, т.е. в соответствии с (1.12) отношение наибольшего к наименьшему диаметру детали, получаемой из трубной заготовки, не должно превышать 1,44. Следует заметить то, что

пластические свойства большинства материалов позволяют осуществить деформирование заготовки на большие коэффициенты формоизменения.

Кроме того, при изготовлении деталей с отношением $r_o/R_o < 0.5$, изготовить коническую деталь за один переход обжимом-раздачей для большинства материалов практически не возможно из-за высокого значения коэффициента формоизменения [18].

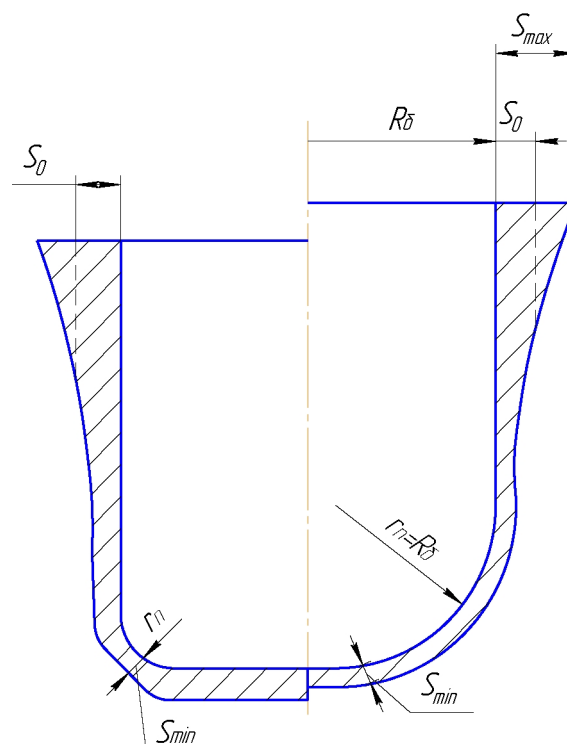
Изготовление рассматриваемой детали возможно с помощью операции вытяжки с последующим отделением донной части.

Исследованию процесса вытяжки посвящено большое количество работ [5-8,9-12,19,20, 23, 26-40, 42,43 и др.]. В большинстве работ, при оценке формы получаемой детали, изменение толщины заготовки не учитывается, а считают, что толщина заготовки в ходе процесса не изменяется. Данный подход позволяет достаточно точно рассчитать технологические параметры процесса, но не может быть использован в случае проектирования технологии изготовления изделия с заданной толщиной.

Оценка изменения толщины заготовки в ходе вытяжки дана в работах [35-40, 44, 45 и др.], с помощью численных методов.

Исследования в области вытяжки, выполненные советскими учеными: Е.А. Поповым [8,9,19], Л.А. Шофманом [15,17], В.П. Романовским [14,23,24] и другими, показывают, что напряженно-деформированное состояние, свойственное операции вытяжки, приводит к неравномерному распределению толщин стенки детали. На рисунке 1.11 показаны типовые эпюры изменения толщины стенок цилиндрических деталей после первой операции вытяжки.

Отличие вытяжки коническим пуансоном от вытяжки цилиндрическим пуансоном заключается в различных размерах очага пластической деформации, возникающего в начальный момент деформирования заготовки. Так, при вытяжке коническим пуансоном очаг деформации в начальный момент имеет размеры $d_o - D_o$ (рисунок 1.12).



слева – плоским, справа – сферическим пуансоном

Рисунок 1.11 – Характер изменения толщины заготовки после вытяжки

В отличие от вытяжки цилиндрическим пуансоном, размеры очага деформации свободного от контакта с инструментом при вытяжке коническим пуансоном значительно больше по размерам, что вызывает возникновение гофр. Для уменьшения вероятности образования гофр на свободном участке к прижиму прикладывается дополнительное усилие.

Традиционно процесс вытяжки разбивают на две стадии: начальную и завершающую [10,23,24].

На рисунке 1.13 показано развитие процесса глубокой вытяжки с прижимом заготовки. Начальная стадия характеризуется локальной пластической деформацией свободного кольцевого участка "а" при зажатом фланце, сохраняющем свои начальные размеры $D_\phi \cong D_0$. Эта стадия вытяжки осуществляется за счет растяжения и утонения кольцевого участка, причем, наибольшее утонение возникает на границе этого участка с дном (см. рисунок 1.12) [23].

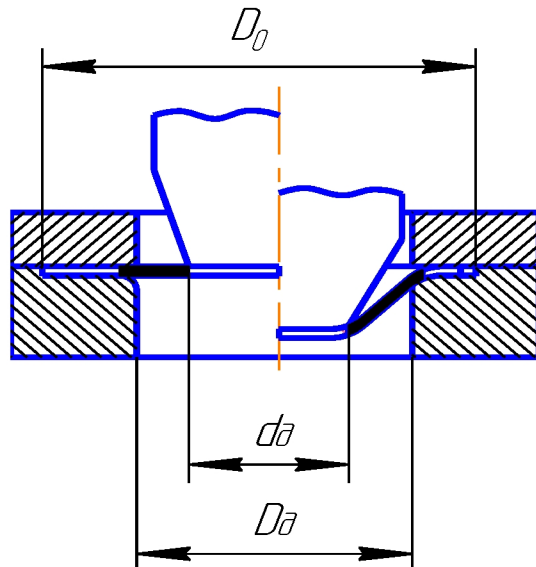


Рисунок 1.12 – Размеры очага пластической деформации на первом этапе вытяжки коническим пуансоном

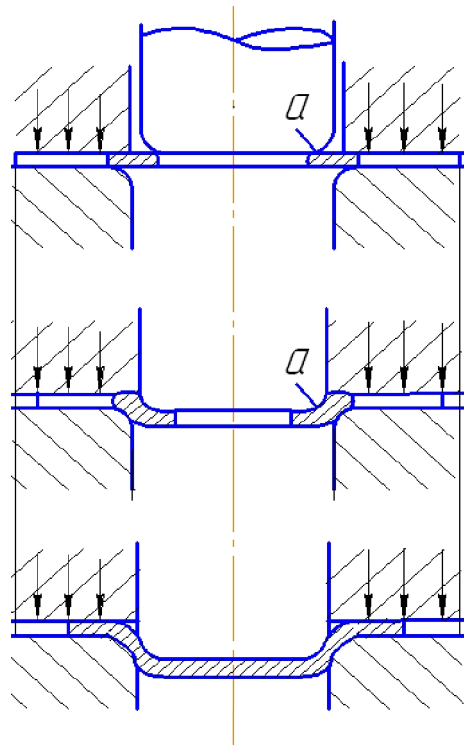
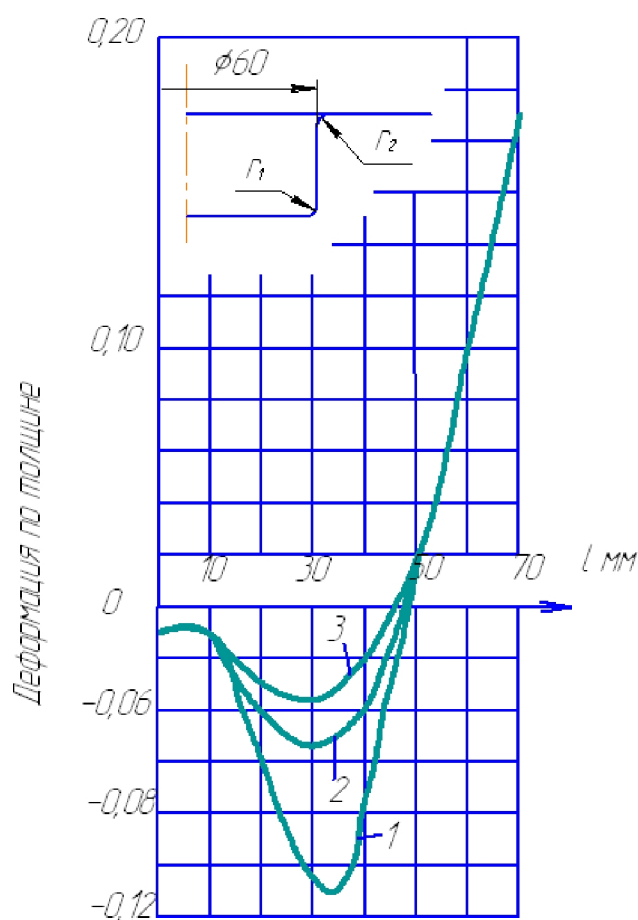


Рисунок 1.13 – Начальная стадия процесса глубокой вытяжки цилиндрической заготовки (штриховкой показана область пластических деформаций)

По мере перемещения пуансона тянущее усилие возрастает, а растяжение и утонение свободного участка увеличивается. После достижения равновесия между тянущим усилием и сопротивлением фланца деформированию начинается вторая, завершающая, стадия процесса вытяжки, заключающаяся в пластической деформации фланца и втягивании его в матрицу.

Одним из серьезных недостатков операции вытяжки является образование утонения в опасном сечении. На величину утонения в опасном сечении оказывает влияние большое количество факторов [18,46-49 и др.]. Влияние геометрии вытяжного инструмента на величину утонения показано на рисунке 1.14.



1. $r_n = r_m = 3S_0$; 2. $r_n = 8S_0, r_m = 3S_0$; 3. $r_n = r_m = 8S_0$ для ст08ВГ

Рисунок 1.14 – Влияние геометрии инструмента на изменение толщины стенки заготовки при вытяжке [18]

На уменьшение толщины заготовки при вытяжке значительное влияние оказывают изгиб и спрямление элементов при переходе на скругленную кромку матрицы и при сходе с нее, а также изгиб по скругленной кромке пуансона [9], который происходит в условиях действия значительных растягивающих напряжений.

Экспериментальные исследования показывают, что величина коэффициента вытяжки $K_{\text{выт}} = \frac{R_0}{R_{\sigma}}$, позволяющего получать деталь без разрушения и чрезмерного утонения, для обычно применяемых в штамповке материалов колеблется в сравнительно узких пределах $K_{\text{выт}} = 1,6 - 2$ [14]. Допустимая степень деформации на последующих переходах, особенно при вытяжке оболочек переменной кривизны, имеет еще меньшую величину (коэффициент вытяжки $K_{\text{выт}} = 1,3 - 1,2$) [14,50].

Данный недостаток - низкая величина предельной степени деформации за одну операцию - при вытяжке высоких деталей приводит к необходимости назначения дополнительных переходов. Для каждого перехода используется отдельная штамповая оснастка, что увеличивает себестоимость изделий. Трудоемкость получения деталей возрастает в связи с введением разупрочняющей термообработки, которую чередуют со штамповочными операциями, а также вспомогательных операций: травления, промывки и пр.

Для изготовления рассматриваемых деталей многопереходной вытяжкой широкое применение нашли методы последовательных цилиндров и параллельных конусов.

По методу последовательных цилиндров осуществляется изготовление ступенчатой заготовки, которая на завершающем этапе калибруется коническим инструментом. По способу последовательных конусов осуществляется последовательная перетяжка коническими пуансонами полученных на предыдущем этапе конических заготовок.

Способ вытяжки методом последовательных конусов позволяет получать детали с уменьшением толщины к меньшему основанию.

Вследствие более интенсивного утонения в ходе формообразования в районе опасного сечения характер распределения толщин получается не монотонным. Наблюдается уменьшение толщины в областях опасных сечений от каждого из переходов. Наличие утонения выражается в виде неровности поверхности детали на этом участке.

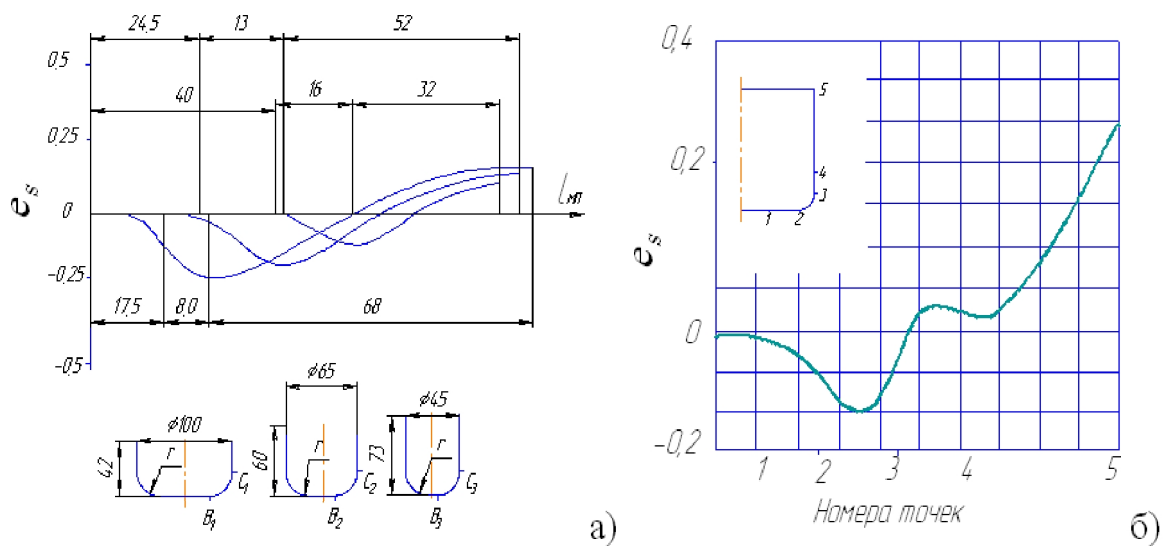
Как показывают исследования [12,14,51,52,54,55,42,43 и др.], обрыв дна заготовки при многопереходной вытяжке происходит на участке закругления пуансона по зоне максимального утонения. Зона максимального утонения предварительного перехода перемещается в процессе вытяжки на стенку и одновременно утолщается вследствие тангенциальной деформации сжатия. Образуется новая зона утонения на радиусе закругления пуансона за счет металла, поступившего со дна.

Таким образом, на последующих переходах образуется несколько зон с утонением материала (рисунок 1.15). Первая зона – основная, соответствующая наибольшему утонению в опасном сечении на первом переходе. Остальные зоны с утонением соответствуют радиусам закруглений пуансонов последующих переходов.

При определении количества операций вытяжки в случае использования метода последовательных конусов, в соответствии с [23,45], на каждой операции получают одну ступень детали, начиная с большего диаметра и заканчивая наименьшим диаметром (рисунок 1.16).

В данном случае если коэффициент формоизменения равен или меньше предельного коэффициента вытяжки для цилиндрического стаканчика, то процесс осуществляется за одну операцию. Значение коэффициента формоизменения рассчитывают по формуле [23]:

$$K = \frac{\frac{h_1 d_1}{h_2 D_0} + \frac{h_2 d_2}{h_3 D_0} + \dots + \frac{h_{n-1} d_{n-1}}{h_n D_0} + \frac{d_n}{D_0}}{\frac{h_1}{h_2} + \frac{h_2}{h_3} + \dots + \frac{h_{n-1}}{h_n} + 1}, \quad (1.11)$$



а – деформация по толщине при осуществлении трех переходов;

б – изменение толщины после второго перехода [12]

Рисунок 1.15 – Деформация и изменение толщины при многопереходной
вытяжке

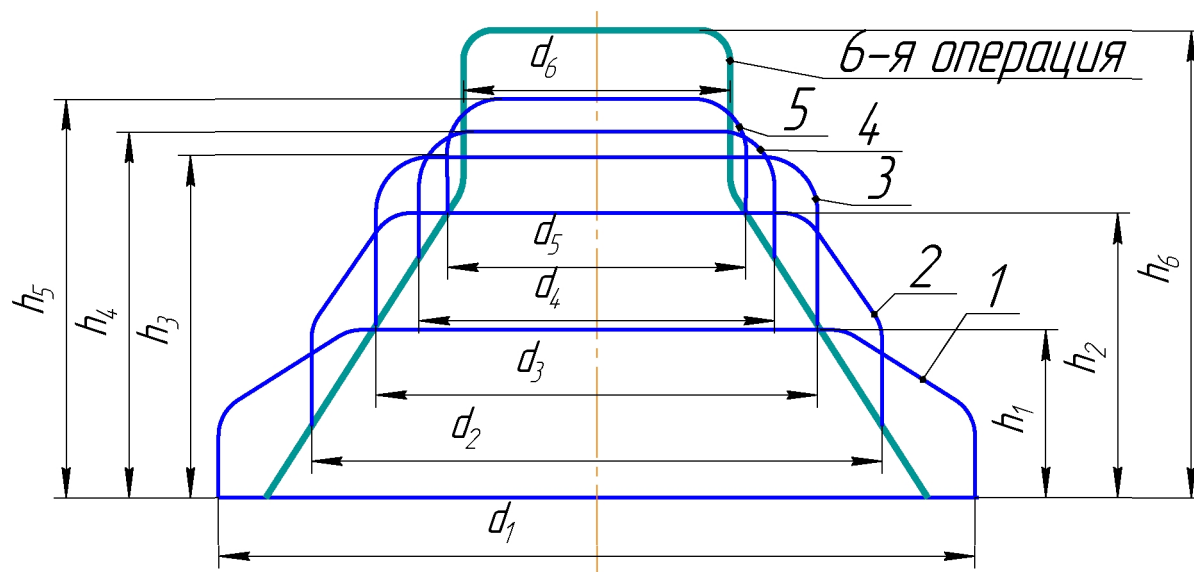
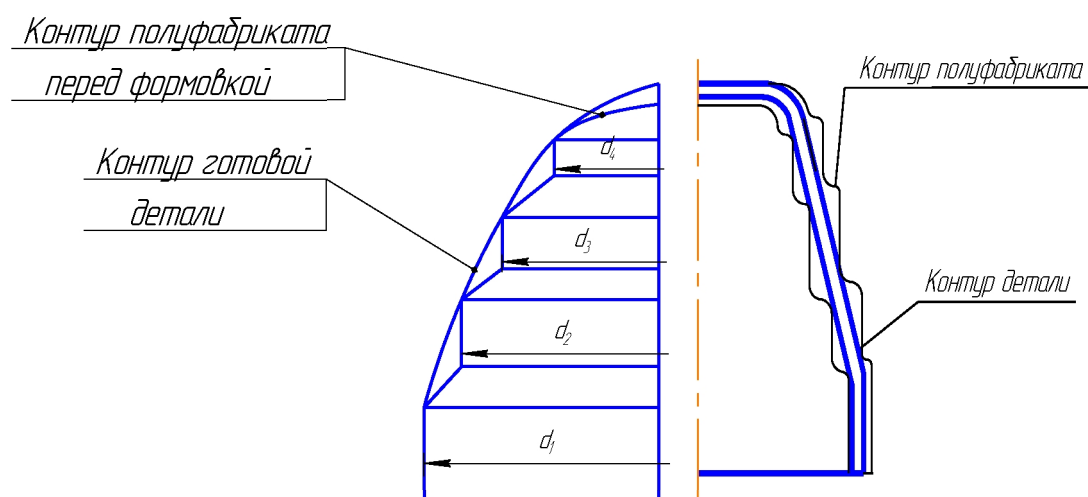


Рисунок 1.16 – Последовательность получения детали
по методу последовательных конусов

где h_1 и d_1 – размеры высоты и диаметра соответствующей ступени, при
условии, что $d_1 > d_2 > d_i$.

Для правильного выбора количества вытяжных операций при использовании метода последовательных цилиндров, для получения меньшей толщины у меньшего основания в ходе проектирования технологического процесса прибегают к следующему правилу “Контур ступенчатого полуфабриката перед операцией формовки (калибровки) должен находиться внутри контура готовой детали и не пересекать его” (рисунок 1.17) [20].

Получаемая после калибровки деталь имеет криволинейную образующую, что также может привести к дополнительному припуску на механическую обработку (см. рисунок 1.17, правая часть) [53].



слева – форма заготовок после переходов,

справа – контур получаемой детали и полуфабриката

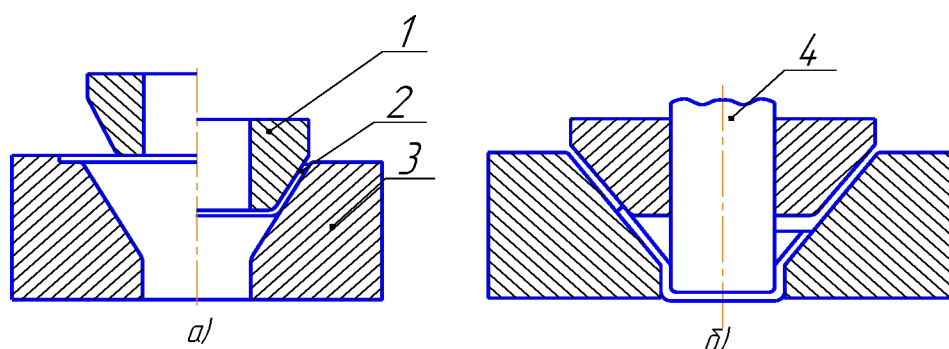
Рисунок 1.17 – Схема к расчету степени деформации при вытяжке по методу последовательных конусов

Работ, посвященных аналитическому исследованию деформированного состояния последующих переходов вытяжки меньше [16]. А.Г. Овчинниковым [56] определено деформированное состояние при последующей вытяжке с учетом изменения толщины стенки. Однако данное решение не учитывает механические свойства материала (показатель упрочнения) и трение между заготовкой и матрицей. В решении не

рассматривается нестационарная стадия вытяжки, на которой происходит основное утонение материала.

Из-за отсутствия достаточно точных решений, до настоящего времени влияние механических свойств штампуемого материала (в частности – показателя упрочнения) на деформацию по толщине заготовки выявлено недостаточно полно. Отсутствуют обоснованные рекомендации по определению величины утонения материала в зависимости от основных технологических параметров процесса последующей вытяжки.

Один из приёмов, позволяющих уменьшить величину утонения и снизить коэффициент вытяжки, связан с применением конструкции штампа с коническим прижимом (рисунок 1.18) [57-59].



а – первый переход, б – второй переход;

1 – конический прижим, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – пуансон

Рисунок 1.18 – Схема вытяжки с коническим прижимом

Параметром, определяющим возможность вытяжки на заключительной стадии без прижима, является предельная величина коэффициента вытяжки $[K_{\text{выт}}]$. В случае вытяжки без прижима в штампе с конической матрицей меньший диаметр конической части прижима определяется по формуле:

$$d_{\text{м}} = \frac{d_0}{[K_{\text{выт}}]}, \quad (1.12)$$

где d_m - меньший диаметр конической части прижима.

Уменьшение длины конической поверхности прижима позволяет назначить большую конусность рабочих поверхностей прижима матрицы, что обеспечивает увеличение глубины вытяжки.

Применение штампа с конусным прижимом позволяет увеличить коэффициент вытяжки на 20-25% в сравнении с плоским прижимом [57-59].

Угол конусности для оптимальных условий вытяжки составляет $20^\circ \div$ [59].

В случае если вытяжка производится не до конца, конусность стенки определяется формой и размерами готового изделия.

Рассмотренная конструкция штампа наиболее благоприятна для средних и низких деталей. Однако конструкцию штампа можно использовать на первой операции многопереходной штамповки.

Серьезным недостатком технологического процесса на основе вытяжки (многопереходной вытяжки) является образование утонения в районе опасного сечения, что увеличивает стоимость изделия за счет назначения дополнительного технологического припуска на материал или увеличения числа переходов.

Кроме того, использование многопереходной вытяжки требует назначения дополнительной операции калибровки для устранения следов от вытяжных переходов (см. рисунок 1.18).

Е.А. Поповым разработан и апробирован способ штамповки, совмещающий в одном переходе операции вытяжки и обжима [60,61]. Проведенные исследования показали, что вытяжка с обжимом может с успехом применяться при получении высоких конических деталей с углом

конусности $\alpha=10^\circ \div 30^\circ$, относительной толщиной стенки $\frac{S_0}{D_0} = 0,02 \div 0,04$ и

отношением диаметров $\frac{d_0}{D_0} = 0,49 \div 0,5$ за одну совмещенную операцию.

Совмещение операций позволяет разгрузить опасное сечение, уменьшить утонение на 25-30% и повысить предельные возможности формоизменения по сравнению с обычной вытяжкой [62].

Большой вклад в развитие схем обжима, в которых используются заготовки, полученные вытяжкой, осуществили сотрудники кафедры обработки металлов давлением Самарского государственного аэрокосмического университета. В работах Попова И.П., Маслова В.Д., Гречникова Ф.В., Чистякова В.П. и др. представлены различные схемы изготовления конических деталей с постоянной толщиной [25,59,61,63-69-73 и др.].

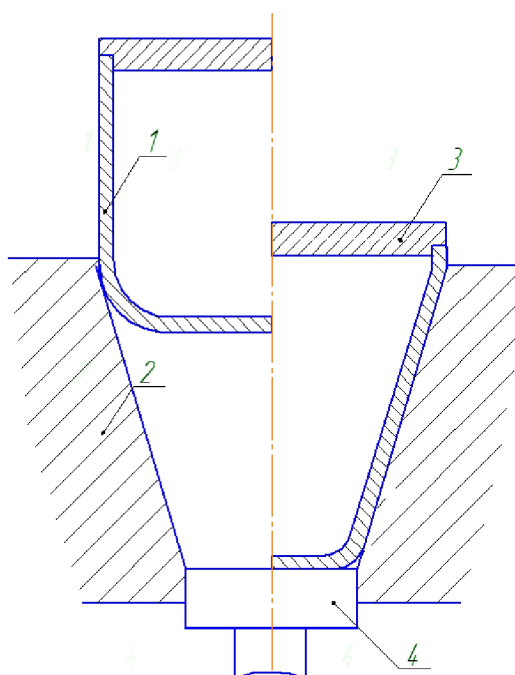
Техническая реализация предлагаемых схем одна – согласование деформации утонения стенки заготовки при вытяжке с деформацией утолщения при обжиге.

В работах [59,63-68] даны методики проектирования технологического процесса обжима цилиндрического полуфабриката. Схема способа приведена на рисунке 1.19.

Для компенсации избыточного утолщения при обжиге у большего основания детали возможно использование способа, по которому изготовление цилиндрической заготовки для обжима осуществляется вытяжкой с утонением [74]. На рисунке 1.20 приведена последовательность изменения формы заготовки.

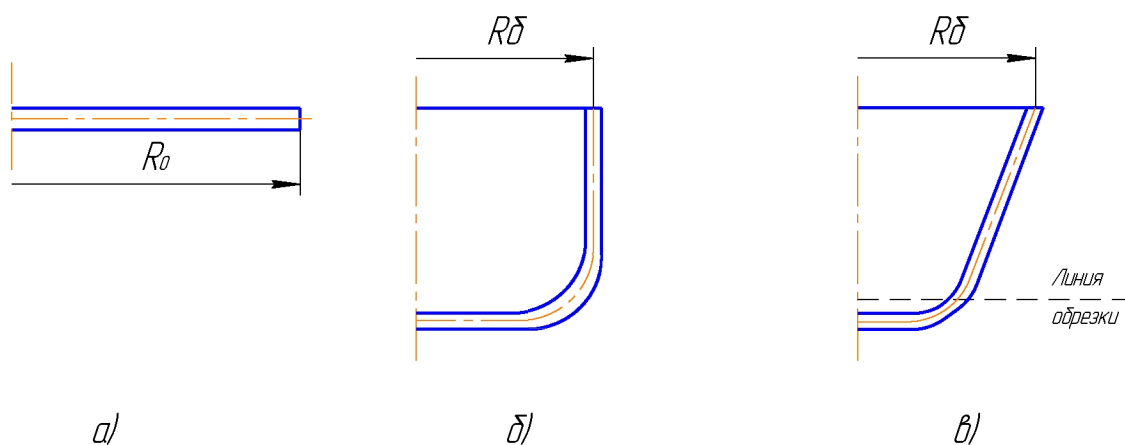
Указанная на рисунке 1.20(в) часть заготовки ниже линии обрезки из-за участка свободного пластичного изгиба имеет большую протяженность, что снижает коэффициент использования материала.

В рассматриваемом диапазоне толщин применение указанного способа позволяет интенсифицировать процесс формообразования сужающихся оболочек. Объясняется это следующим.



1 – заготовка, полученная вытяжкой; 2 – матрица,
3 – плоский пуансон; 4– выталкиватель

Рисунок 1.19 – Схема обжима цилиндрической заготовки без отверстия



а – исходная заготовка; б – заготовка после вытяжки;
в – заготовка после обжима (перед обрезкой)

Рисунок 1.20 – Последовательность изменения формы заготовки [63-68]

При вытяжке деталей предельное формоизменение ограничено прочностью опасного сечения или возникновением чрезмерного утонения материала в результате действия значительных растягивающих напряжений

σ_p . Для восстановления технологической пластичности материала штамповочные операции чередуются с разупрочняющими отжигами.

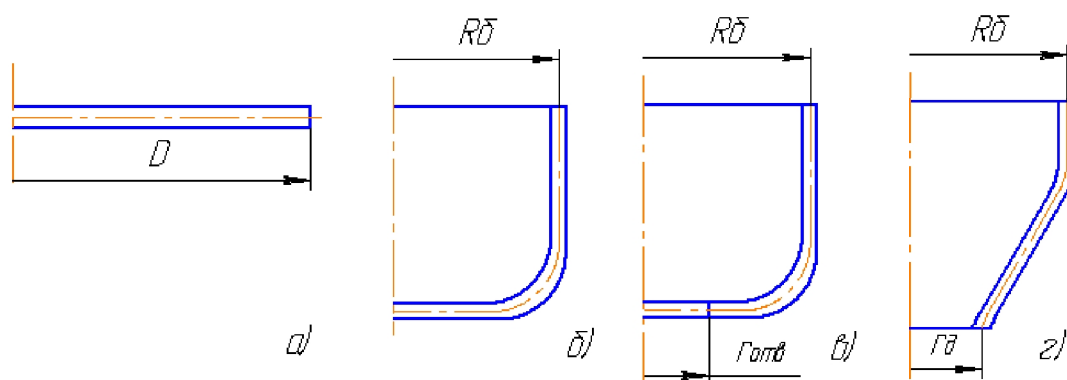
При обжиге заготовки в сужающейся матрице материал деформируется в условиях двухосного сжатия, что повышает его пластичность и позволяет устранить ряд разупрочняющих отжигов [48,49].

Обжим заготовки с дном, как и обжим трубной заготовки, увеличивает возможности протекания процесса без разрушения материала в опасном сечении, т.к. в этом случае возможности процесса определяются потерей устойчивости заготовки.

Основной направленностью работ [48,49,57-59,62-67,75,76], изучающих обжим цилиндрической заготовки, являлось получение равнотолщинной детали. Для получения рассматриваемого характера распределения толщин у детали желательно использовать цилиндрическую заготовку с распределением толщин, совпадающим с распределением толщин у детали. В ходе обжима в этом случае устраняется утонение, возникшее в районе опасного сечения.

Повысить коэффициент использования материала можно за счет использования известной схемы (рисунок 1.21), в соответствии с которой удаление материала с донной части осуществляется перед обжимом [75].

Для получения детали с наименьшей толщиной у меньшего основания целесообразно осуществлять обжим цилиндрической заготовки с отверстием, изготавливаемой вытяжкой из кольцевой заготовки [77-82 и др.]. Схема способа показана на рисунке 1.22. С помощью вырубki-пробивки получается заготовка в виде кольца. Затем заготовка укладывается в вытяжную оснастку. Прижим заготовки между матрицей и прижимной плитой производится заданным усилием прижима Q .

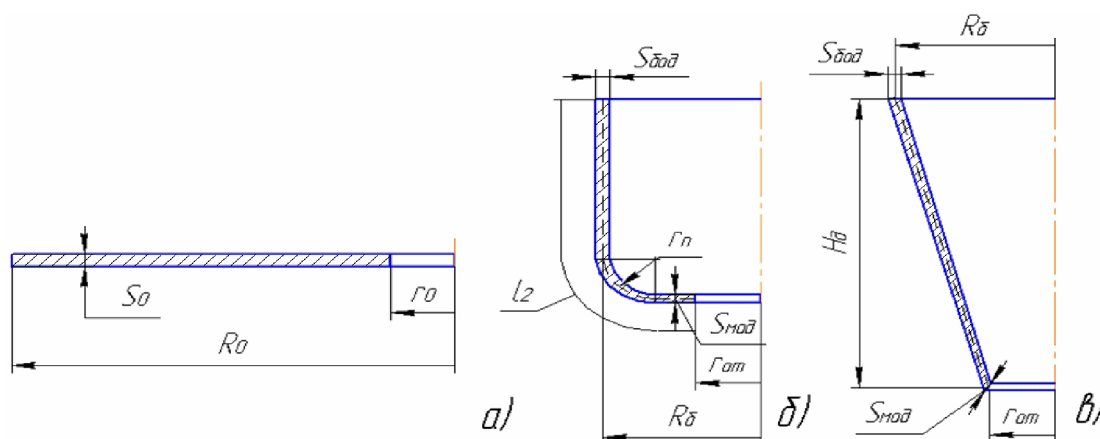


а – исходная заготовка; б – после вытяжки;

в – заготовка после разделительной операции; г – деталь

Рисунок 1.21 – Схема способа обжима заготовки с отверстием

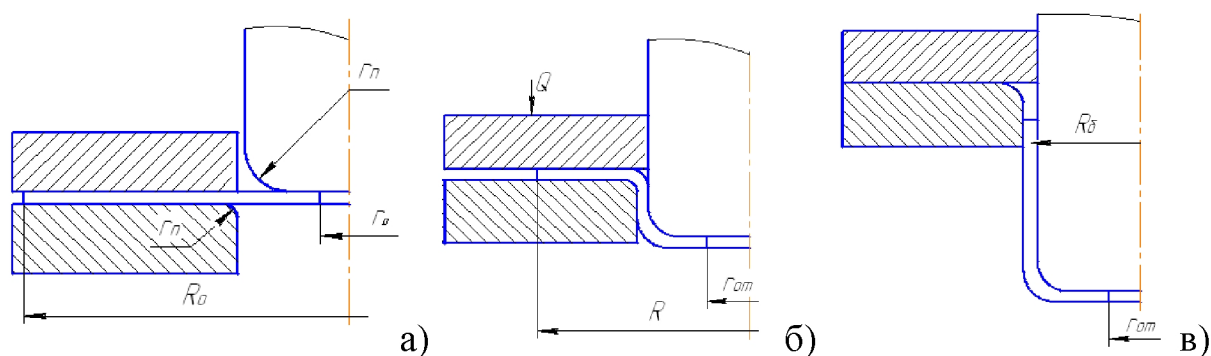
В результате вытяжки получается цилиндрическая заготовка с отверстием в донной части, имеющая диаметр $d_0 = d_o$, с определённым распределением толщин вдоль образующей, в котором имеет место утонение в зоне радиусного перехода и на кромке отверстия (рисунок 1.23).



а – исходная кольцевая заготовка; б – заготовка после вытяжки;

в – заготовка (деталь) после обжима

Рисунок 1.22 – Последовательность изменения формы заготовки при получении цилиндрической заготовки из кольца



а – начальный этап деформирования; б – момент достижения
наибольшего усилия; в – заключительный этап деформирования

Рисунок 1.23 – Схема вытяжки кольцевой заготовки

Согласно [12,18], в результате процесса вытяжки деталей с отверстием в зависимости от геометрических размеров исходной заготовки и диаметра пуансона можно получить две различные по форме детали (рисунок 1.24) [18].

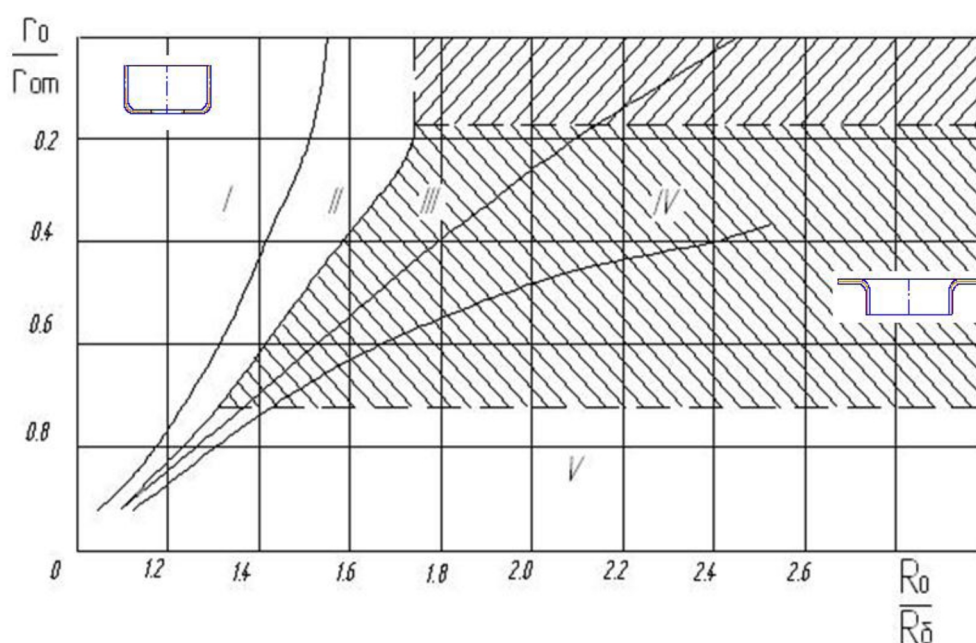
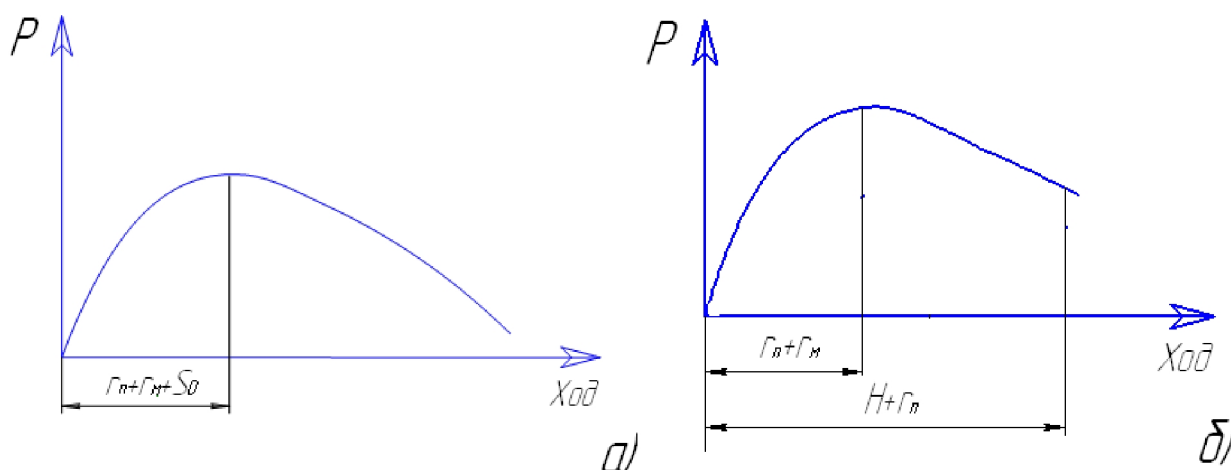


Рисунок 1.24 – Диаграмма геометрических соотношений, определяющих
условия протекания вытяжки и отбортовки при процессе
вытяжки кольцевой заготовки [18]

Объяснить форму получаемой детали можно, если рассмотреть развитие усилий для процессов вытяжки и отбортовки. Согласно теоретическим данным [10,23], наибольшее значение усилия в процессах вытяжки и отбортовки достигается при $h = r_n + r_m + S_0$ и $h = r_n + r_m$ соответственно (рисунок 1.25).



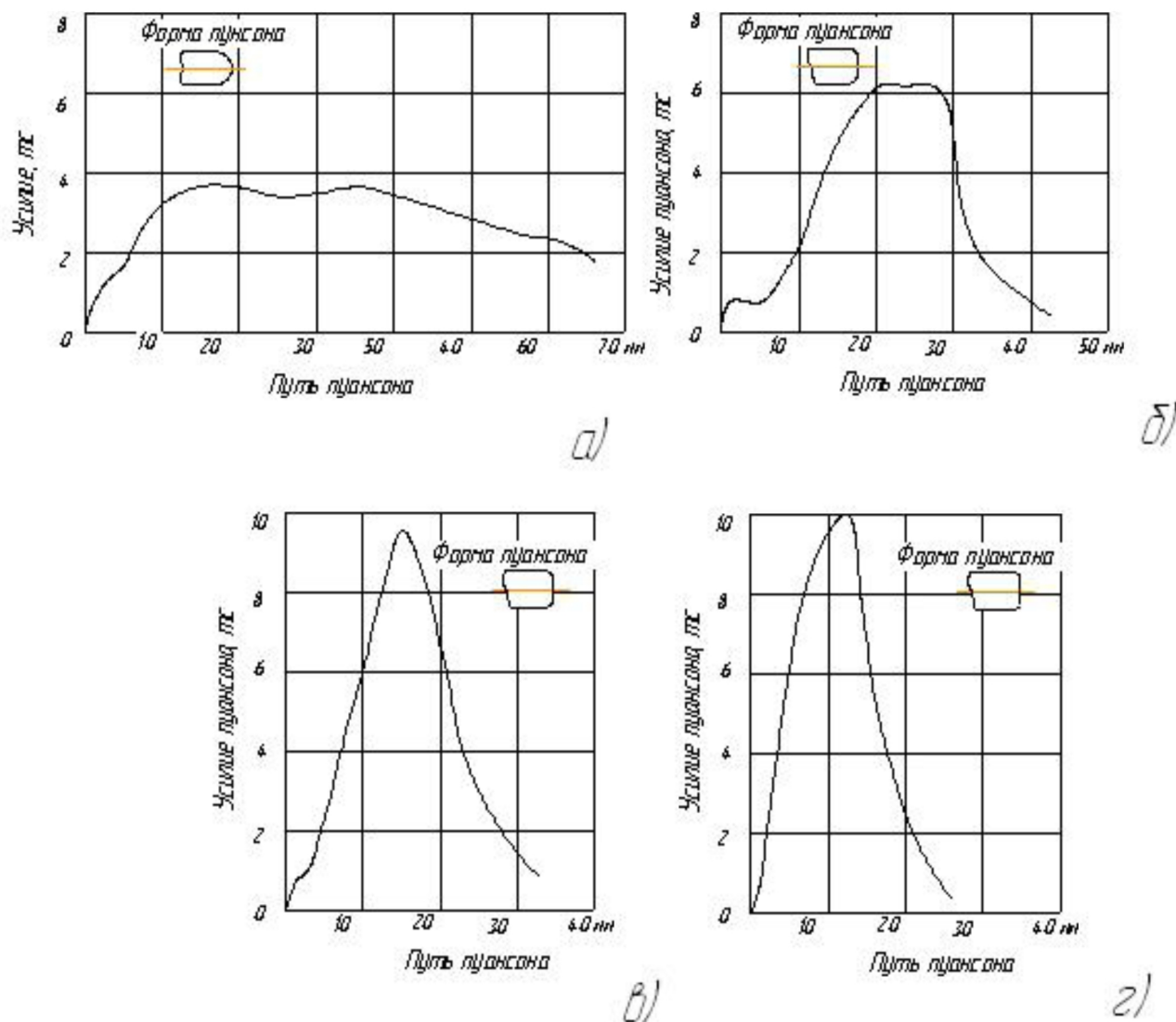
а – при вытяжке; б – при отбортовке

Рисунок 1.25 – Теоретические графики изменения усилия в процессе вытяжки кольцевой заготовки в зависимости от величины перемещения пуансона

Согласно приведенным в работе [18] данным, наибольшее усилие при наименьшем перемещении инструмента достигается при отбортовке пуансоном с плоским торцом (рисунок 1.26). Но при проектировании процесса возможно использование пуансона с различной формой рабочей поверхности, а это, в свою очередь, изменяет условие протекания процесса и получаемую форму детали, смещает кривые, ограничивающие области вытяжки и отбортовки, показанные на рисунке 1.26.

На практике максимальное значение усилия, получаемое теоретическим путем, не совпадает с экспериментальными данными. Это объясняется тем, что при теоретическом анализе считается, что пластическая деформация

начинается сразу после приложения к заготовке усилия, что не соответствует действительности. Так, согласно данным [18], приведенным на рисунке 1.27, теоретическое значение наибольшего при вытяжке усилия должно наступать раньше, чем это происходит в действительности. Согласно тому же источнику, максимум усилия при вытяжке наступает при перемещении пуансона на величину равную 0,4-0,6 от глубины вытяжки.



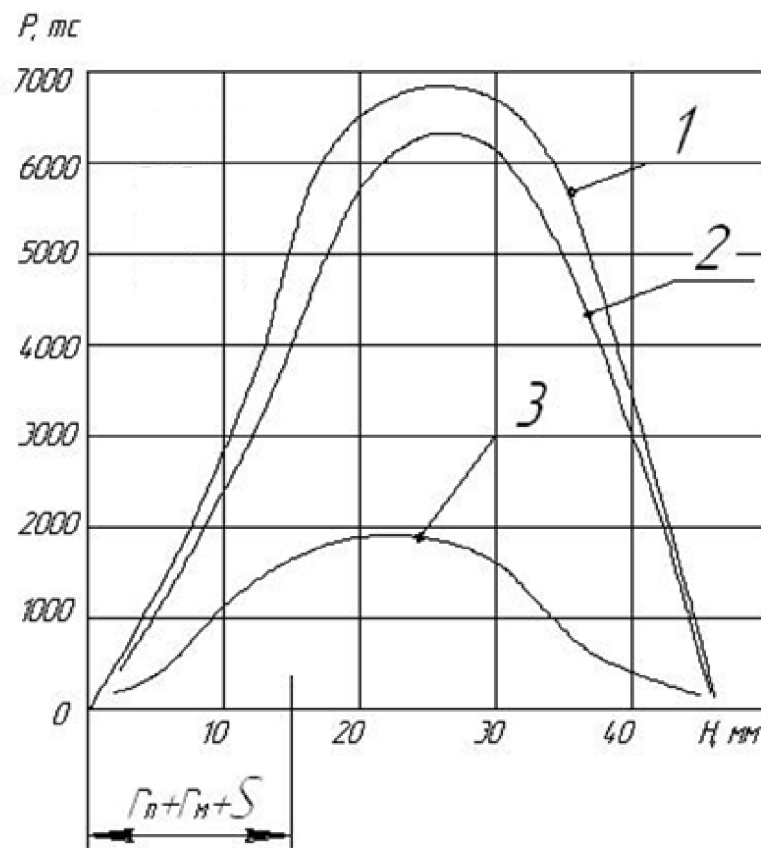
а – криволинейной; б – сферической; в – цилиндрической с большим закруглением; г – цилиндрической с малым закруглением

Рисунок 1.26 –Влияние формы пуансона на усилие при отбортовке [18]

Из приведенного выше следует, что необходимо проведение дополнительного исследования позволяющего определить технологические

параметры процесса вытяжки кольцевой заготовки с учетом получения детали требуемых размеров.

При обжиме цилиндрической заготовки, полученной вытяжкой, на заданную величину в матрицу (рисунок 1.29), размеры которой соответствуют размерам и форме изделия, получается деталь с меньшей толщиной у меньшего основания (рисунок 1.28).



1 – сталь 08; 2 – Латунь Л62; 3 – алюминий [18]

Рисунок 1.27 – Экспериментальные кривые усилия при вытяжке одинаковых по размерам заготовок с одинаковым коэффициентом вытяжки при

$K_{\text{выт}}=2,00$, $S_0=1,5$ мм, $D_0=100$ мм, $R_б=50$ мм

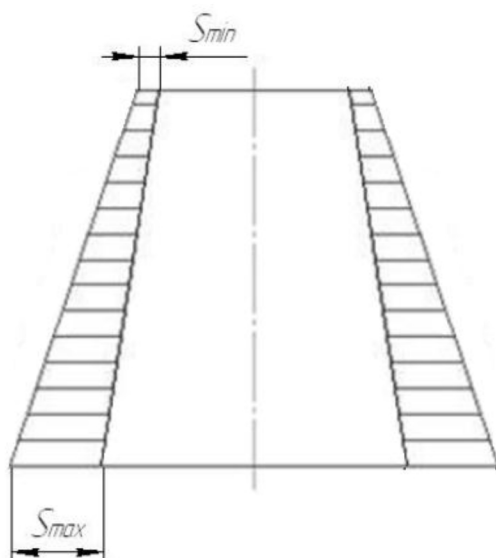
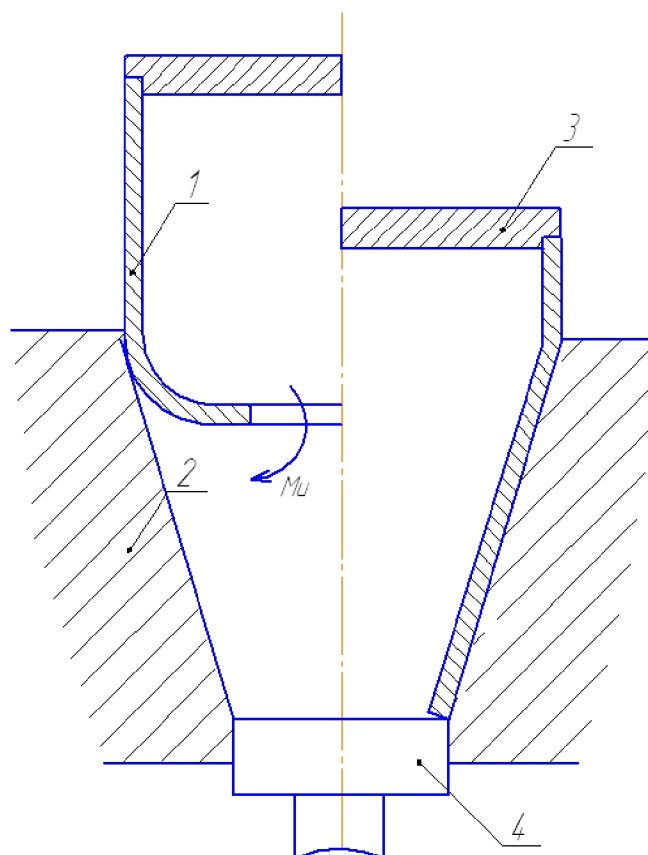


Рисунок 1.28 – Характер изменения толщины вдоль образующей у рассматриваемой группы деталей

Данный способ в сравнении со способом вытяжки из круглой заготовки и последующего обжима цилиндрической заготовки, во-первых, даёт возможность сэкономить металл из-за использования заготовки при обжиме меньшей высоты и, следовательно, меньшего диаметра при вытяжке, во-вторых, уменьшить как коэффициент вытяжки, так и обжима, следовательно, увеличивает вероятность изготовления детали без брака.



1 –заготовка, 2 – матрица, 3 –пуансон, 4 –выталкиватель

Рисунок 1.29 – Схема обжима цилиндрической заготовки с отверстием

Использование круглой заготовки для получения конических деталей требует обрезки донной части и тороидальной части с радиусом закругления $R_{изг}$, полученного при действии изгибающего момента при деформировании вне контакта с инструментом (рисунок 1.30). По площади, как показывают расчеты, это 1.20-1.35 раза больше в сравнении с площадью круга радиуса r_0 (рисунок 1.22). Это приводит к тому, что в отход идёт меньшая часть заготовки. Кроме того, при обжиме заготовки с отверстием нет необходимости прикладывать избыточное усилие к ее стенке для проталкивания донной части в матрицу, что способствует повышению предельных возможностей процесса.

Таким образом, способ обжима цилиндрической заготовки с отверстием, полученной вытяжкой из кольца, является наиболее перспективным для получения конических деталей рассматриваемой группы (рисунок 1.28),

однако, его применение сдерживается отсутствием научно-обоснованной методики проектирования.

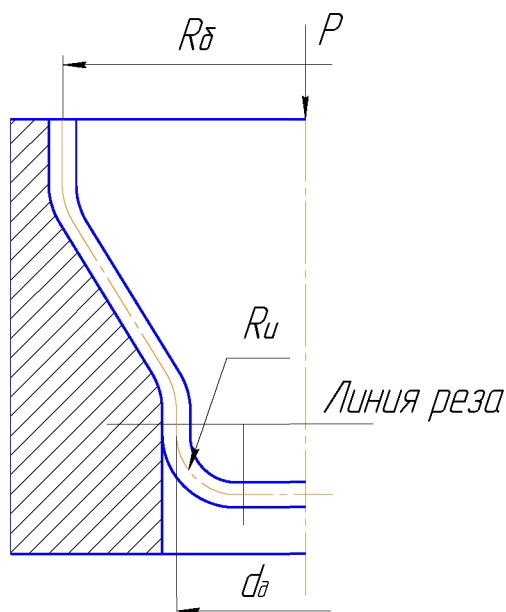


Рисунок 1.30 – Схема обжима цилиндрической заготовки с дном

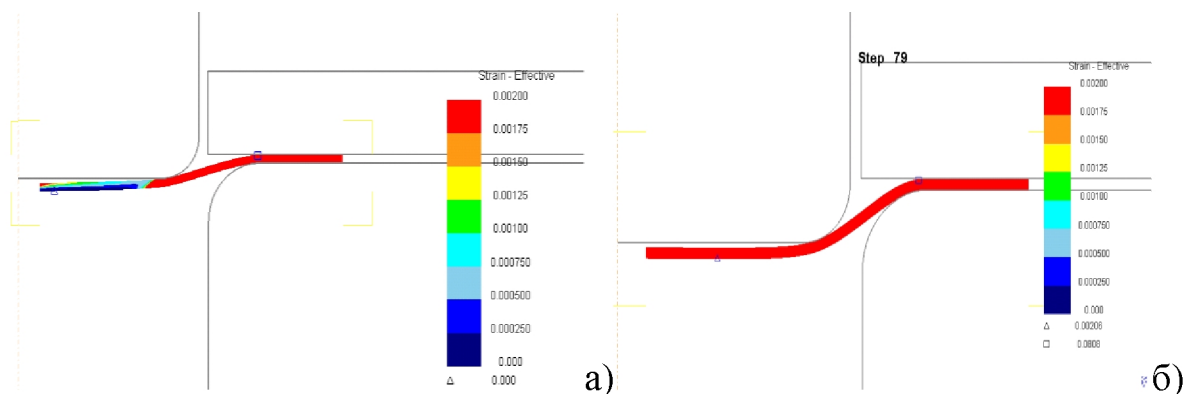
Полученная методика позволяет однозначно определить значения толщины исходной заготовки, но на практике практически не применима в связи с необходимостью использования сложного математического аппарата. Также очевидно, что с помощью программных продуктов возможно упрощение исходной аналитической постановки задачи.

Наиболее однозначное упрощение получается, при использовании допущений об известном значении получаемой толщины заготовки, по окончании процесса. Совместное использование этого допущения с аналитическими зависимостями, получаемыми для частных случаев теории листовой штамповки, позволяет упростить постановку задачи до решения одного уравнения. Ниже приведены примеры разработки данной методики.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ КОЛЬЦЕВОЙ ЗАГОТОВКИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ DEFORM

Приводимая выше методика была использована для создания модели изменения толщины листовой заготовки на примере процессов: вытяжка из кольцевой заготовки, обжим цилиндрической заготовки, обжим раздача трубной заготовки. Для получения исходных допущений о характере деформирования заготовки использовалась программа DEFORM.

Особенностью вытяжки кольцевой заготовки является наличие двух нестационарных этапов в начале и окончании деформирования заготовки. Так, в начале деформирования заготовки участок пластических деформаций охватывает область, показанную на рисунке 2.1 красным цветом. По мере перемещения пуансона происходит увеличение области пластических деформаций до полного охвата заготовки.



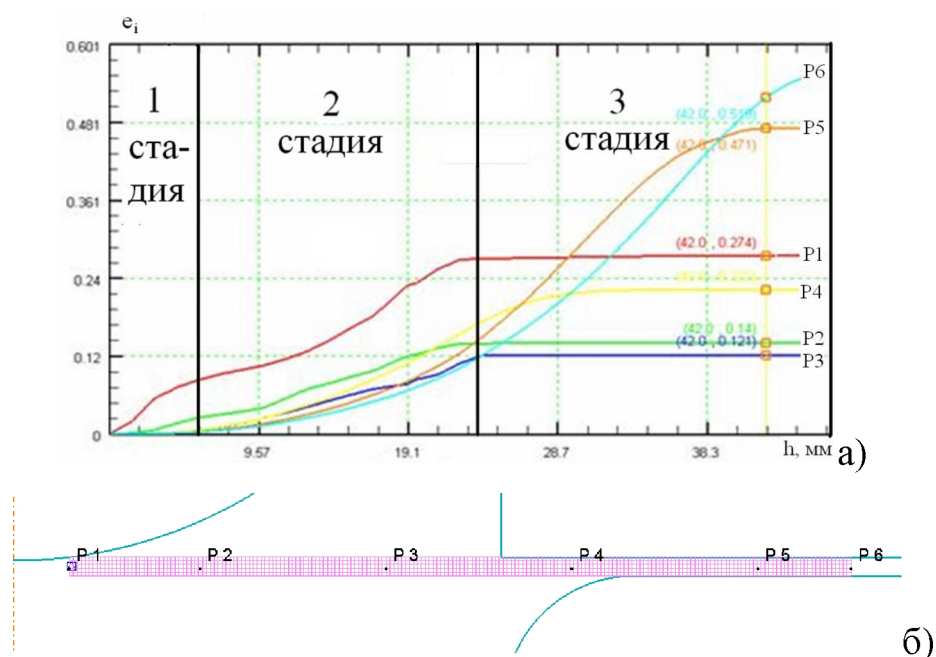
а – первый этап изменения очага деформаций; б – стационарный этап деформирования

Рисунок 2.1 – Этапы изменения очага деформаций для случая,

когда $K_{\text{выт}}=1.5$, $r_n/R_\sigma = 0,20$, $r_0/R_\sigma = 0,12$

На рисунке 2.2 показаны значения интенсивности деформации в различных точках полученной заготовки, рассчитанные в программе DEFORM, в зависимости от хода пуансона. На рисунке в нижней части

показано положение точек P1-P6, а в верхней части (на графике) изменение интенсивности деформаций соответственно 1 – в точке P1, 2 – в точке P2 и т.д.



а – изменение интенсивности деформаций в точках P1, P2 ... P6;

б – положение точек P1, P2 ... P6

Рисунок 3.2 – Изменение интенсивности деформаций (e_i) в характерных точках кольцевой заготовки по ходу пуансона

$$(n = 0,1, K_{\text{выт}} = 1,5, r_n/R_0 = 1,00, r_0/R_0 = 0,12)$$

На основании результатов исследования деформированного состояния в кольцевой заготовке установлено, что процесс вытяжки, как и для сплошной заготовки, целесообразно рассматривать состоящим из трех стадий.

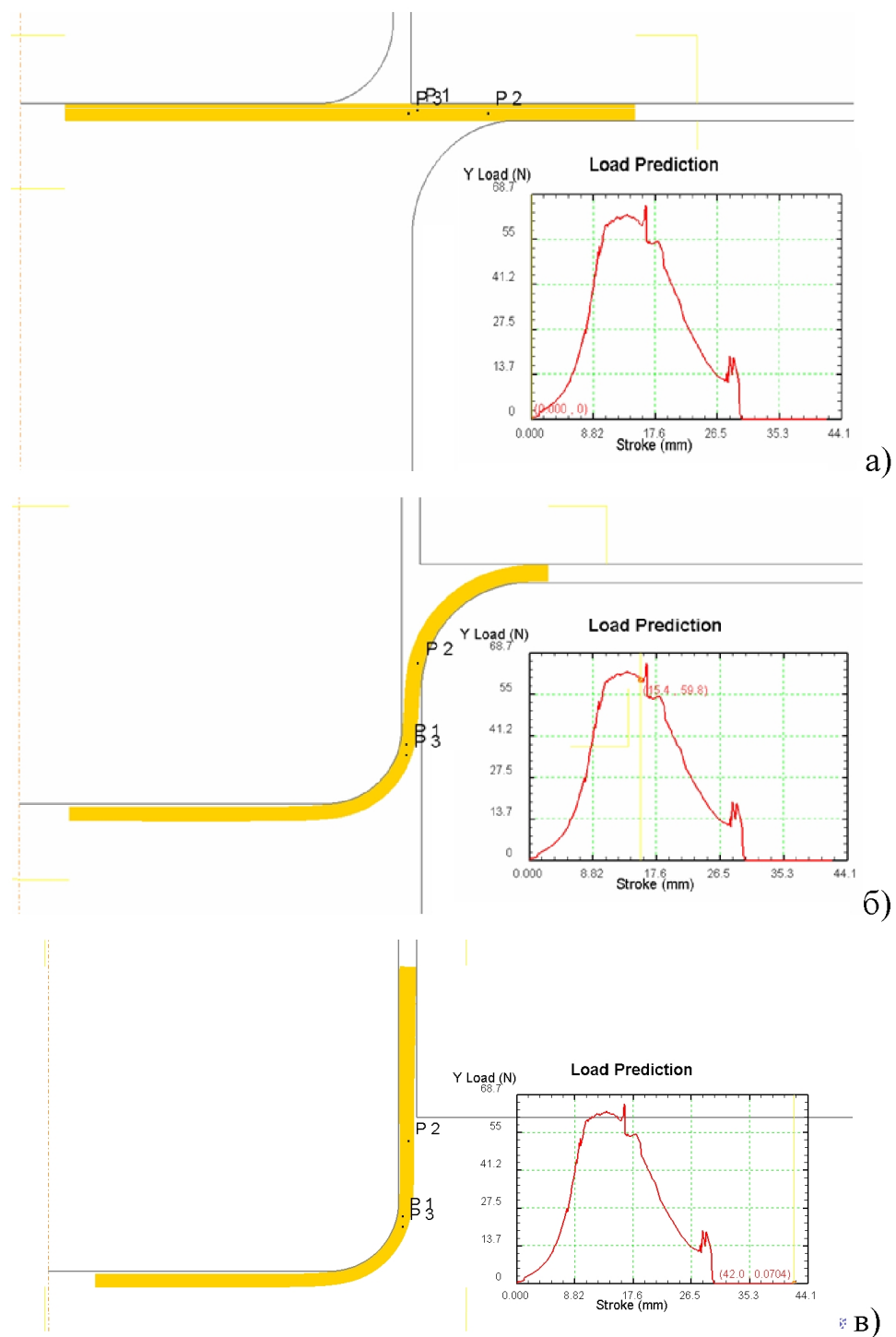
Первая стадия характеризуется ростом очага деформаций до момента перевода всей заготовки в пластическое состояние. На второй стадии начинает перемещаться кромка фланца заготовки. Происходит пластическое течение всей заготовки. Третья стадия начинается с момента, уменьшения усилия процесса, при этом осуществляется перетягивание материала фланца заготовки через кромку матрицы.

Таким образом, для определения толщины в донной части у полученной вытяжкой цилиндрической заготовки, необходимо рассматривать момент достижения наибольшего усилия процесса.

С целью определения формы заготовки в момент достижения наибольшего усилия вытяжки кольцевой заготовки, была проведена серия вычислительных экспериментов. На рисунке 2.3 показано изменение положения свободного участка, заданного в момент достижения наибольшего усилия процесса (участок ограничен зонами P1 и P2).

Как видно из рисунка, изначально данный участок был расположен во фланцевой части заготовки. После достижения наибольшего усилия процесса положение этого участка по отношению к донной части заготовки не изменяется.

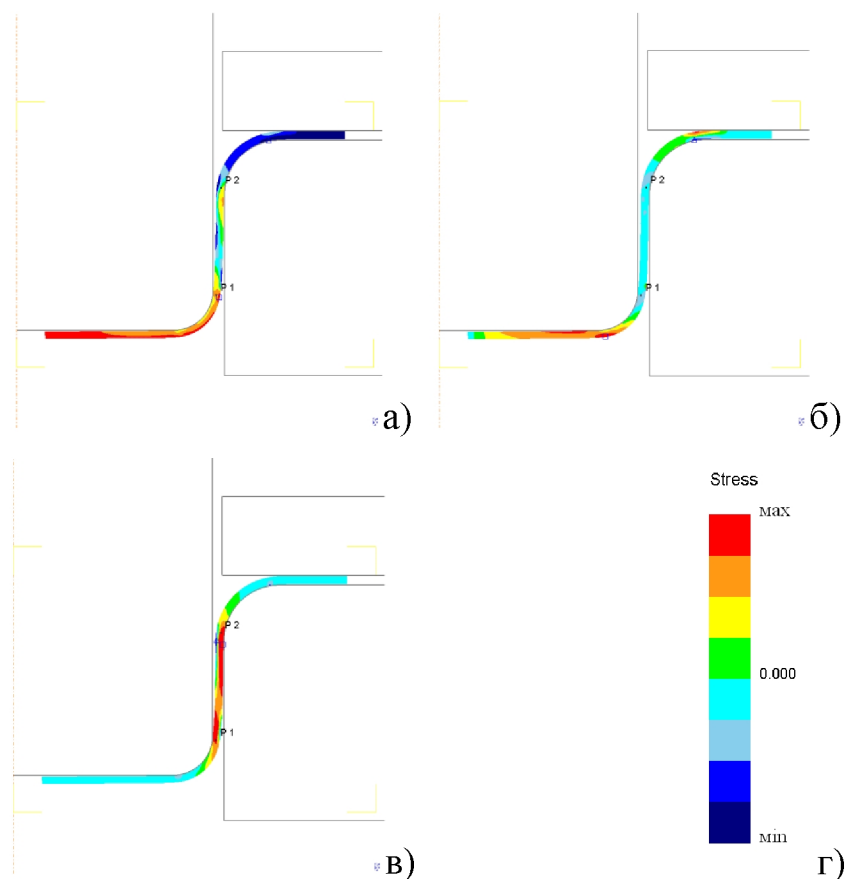
На рисунке 2.3 точкой P3 показано также положение области наибольшего утонения заготовки (опасное сечение). Как видно из рисунка, при традиционных рекомендациях [10] по выбору величины r_n/R_o опасное сечение расположено вблизи свободного участка.



а – в начальный момент штамповки; б – в момент достижения наибольшего усилия; в – в заключительный момент штамповки

Рисунок 2.3 – Положение точек, ограничивающих свободный участок, в момент достижения наибольшего значения усилия процесса при $K_{\text{выт}}=1,65$, $n=0,1$, $r_0/R_6=0,12$

На рисунке 2.4 дана качественная оценка напряжений, возникающих в различных направлениях в кольцевой заготовке при ее вытяжке в момент достижения наибольшего усилия процесса (синим цветом показаны области сжимающих напряжений, красным - растягивающих).



а – в плоскости, перпендикулярной рассматриваемому сечению;

б – в направлении оси абсцисс; в – в направлении оси ординат;

г – шкала значений для качественной оценки

Рисунок 2.4 – Напряжения, возникающие в заготовке в момент достижения наибольшего усилия вытяжки кольцевой заготовки ($K_{\text{выт}}=2,1$, $r_0/R_б=0,12$)

Заметим, что на свободном участке широтные напряжения малы по величине. Таким образом, условно можно выделить три участка с различными схемами напряженного состояния.

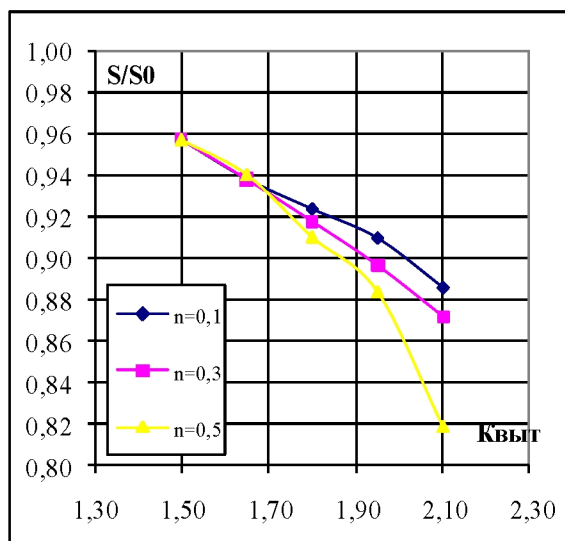
На первом участке схема напряженного состояния близка к плоской равнонапряженной. Величины напряжений на данном участке могут быть приближенно рассчитаны по зависимостям, описывающим процесс вытяжки.

На втором участке схема напряженного состояния близка к схеме линейного растяжения (широтные напряжения равны нулю), поскольку инструмент на заготовку практически не оказывает прямого воздействия.

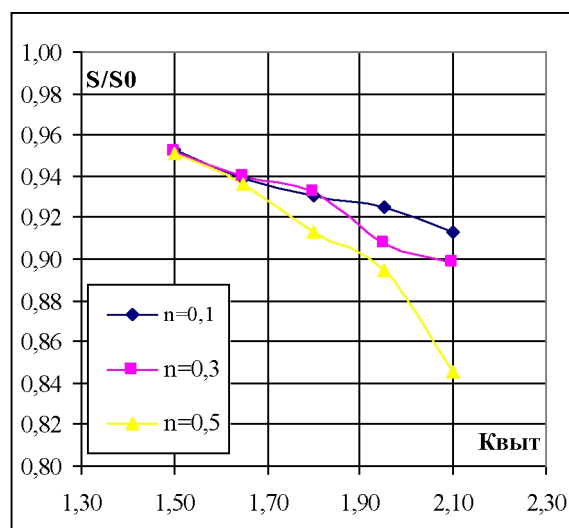
Третьему участку (в районе дна) соответствует схема двухосного растяжения, на этом участке осуществляется отбортовка отверстия. Приближенно величины напряжений, возникающих на этом участке, могут быть описаны в соответствие с аналитическими зависимостями для процесса отбортовки.

На рисунках 2.5–2.6 показано влияние показателя степени упрочнения материала на наименьшую толщину и положение в опасном сечении при вытяжке заготовки без отверстия в зависимости от $K_{\text{выт}}$ и относительного значения радиуса скругления пуансона r_p/R_b . Как видно из рисунка 2.5, r_p/R_b не оказывают сильного влияния на величину относительной толщины S/S_0 , в то время как $K_{\text{выт}}$ оказывает существенное влияние на S/S_0 .

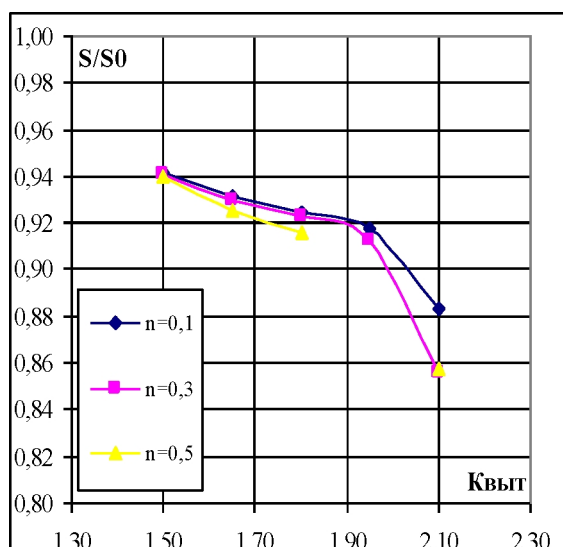
Анализ рисунка 2.6 показывает, что при малых значениях относительного радиуса скругления пуансона положение опасного сечения близко к участку перехода в стенку. С увеличением r_p/R_b наблюдается разброс значений положения опасного сечения, что может быть объяснено погрешностью моделирования с помощью метода конечных элементов, поскольку при увеличении r_p/R_b локализация утонения в опасном сечении уменьшается, и поэтому для поиска опасного сечения требуется более мелкая сетка. Общая совокупность точек при больших радиусах скругления смещена к оси заготовки.



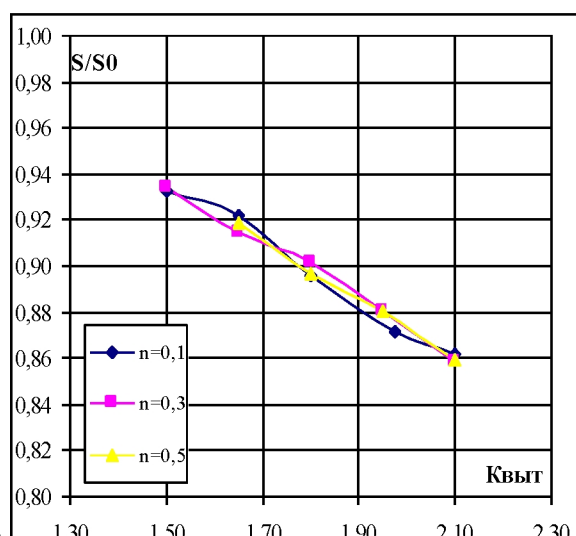
а)



б)



в)



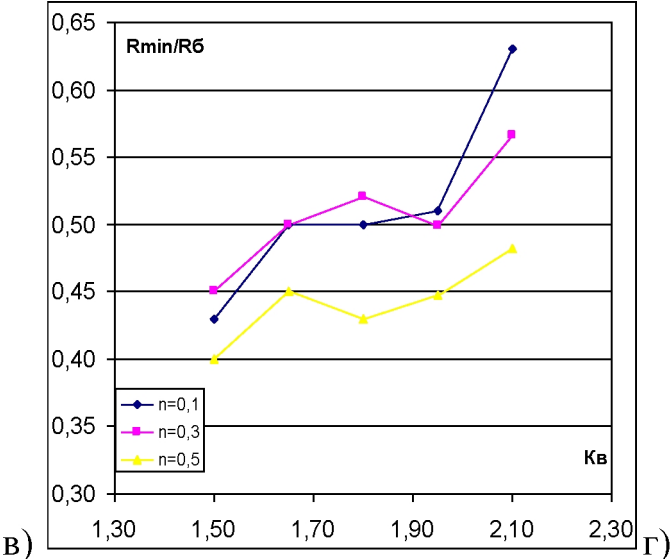
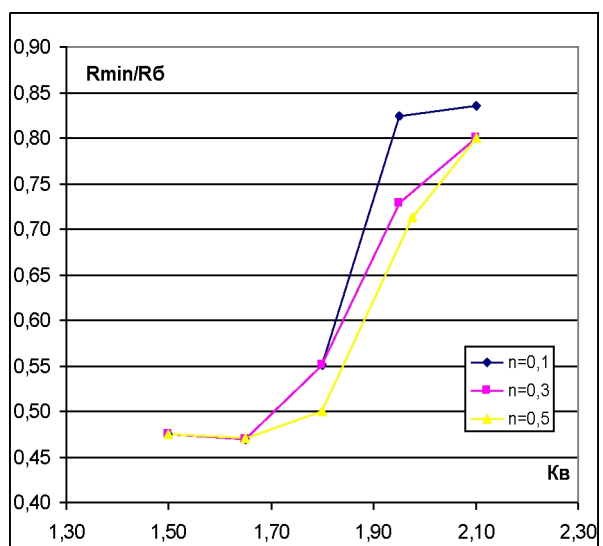
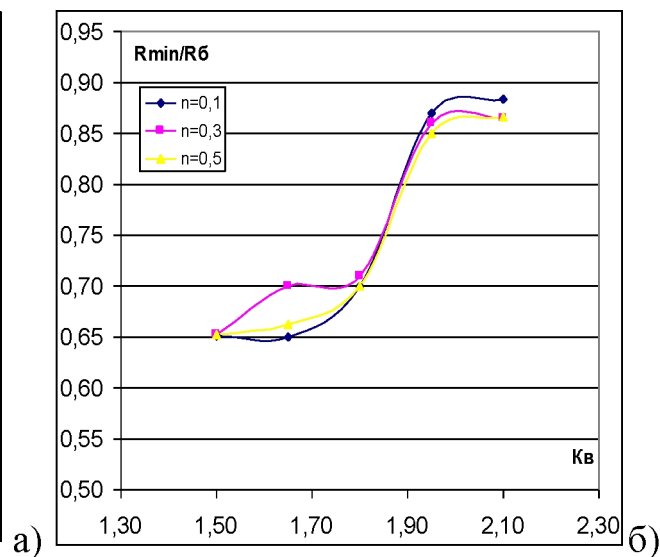
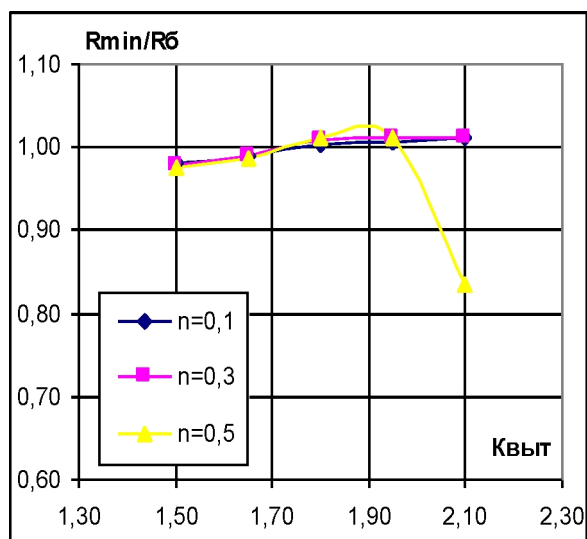
г)

а, б, в, г – $r_n/R_0 = 0,2$, $r_n/R_0 = 0,4$, $r_n/R_0 = 0,6$, $r_n/R_0 = 1,0$ соответственно

Рисунок 2.5 – Влияние n и $K_{выт}$ на относительную толщину цилиндрической заготовки в опасном сечении

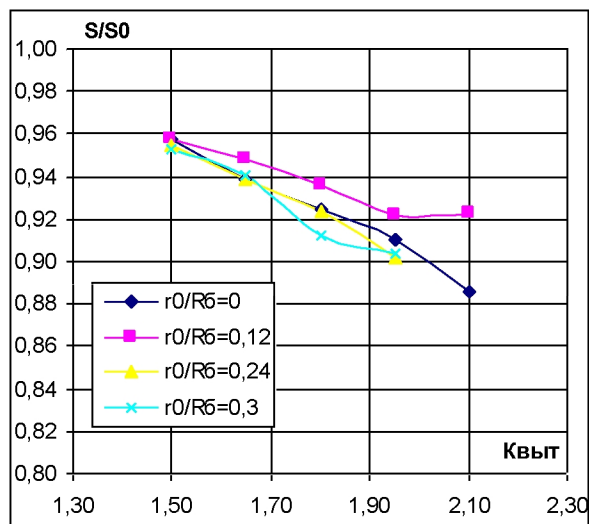
Данные по влиянию отверстия на наименьшую толщину и положение опасного сечения при осуществлении вытяжки кольцевой заготовки показаны на рисунках 2.7, 2.8. Как видно из рисунка 2.7, в отличие от вытяжки заготовки без отверстия, при вытяжке заготовки с отверстием r_0/R_0 оказывает существенное влияние на наименьшую величину S/S_0 , при этом влияние r_0/R_0 ощутимо только при больших значениях r_0/R_0 . Совместный анализ рисунков 2.7 и 2.8 показывает, что при $r_0/R_0 = 1$ при любых $K_{выт}$, при

$r_0/R_{\Pi} > 0,25$ значения наименьшей толщины находятся на кромке отбортовываемого отверстия.

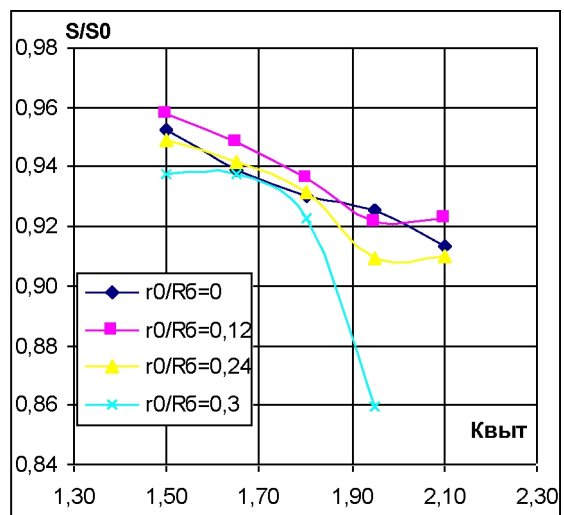


а, б, в, г – $r_n/R_{\sigma} = 0,2$, $r_n/R_{\sigma} = 0,4$, $r_n/R_{\sigma} = 0,6$, $r_n/R_{\sigma} = 1,0$ соответственно

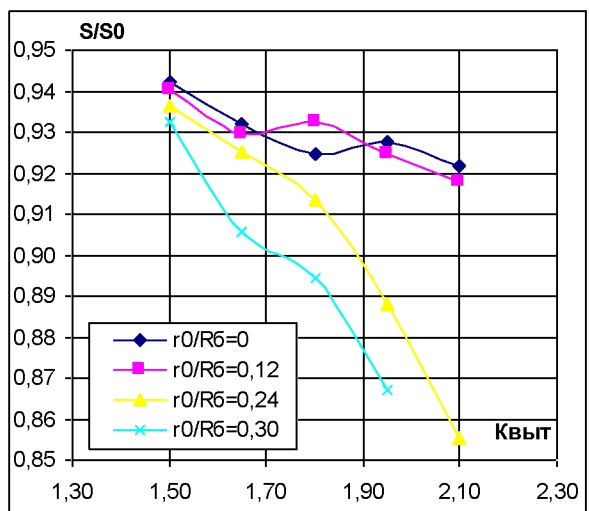
Рисунок 2.6 – Влияние n и $K_{\text{выт}}$ на положение опасного сечения элемента с координатой $R_{\text{min}}/R_{\sigma}$ у цилиндрической заготовки



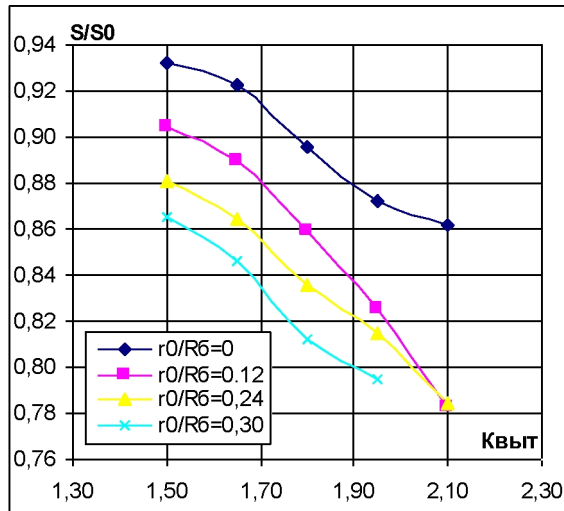
а)



б)



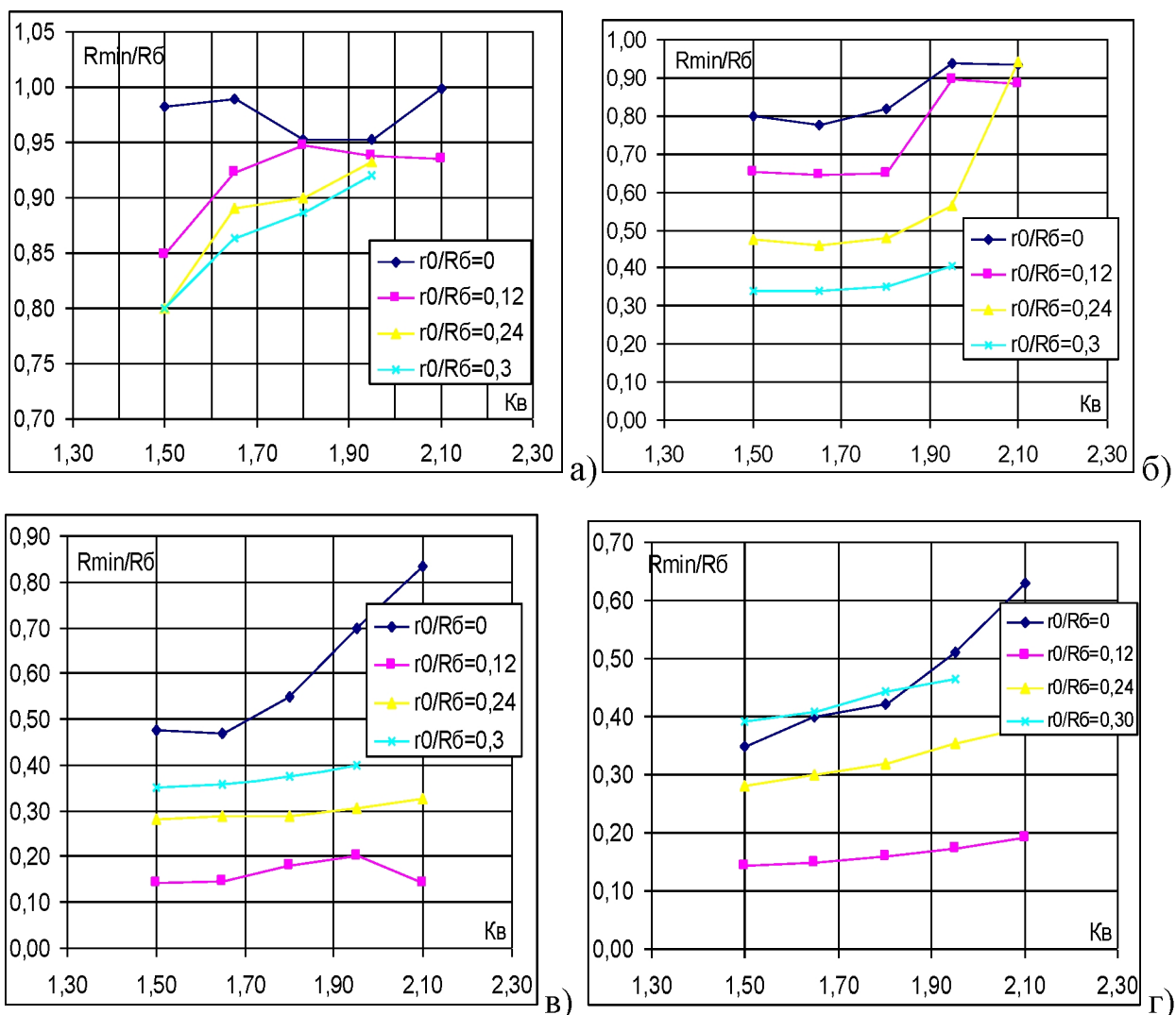
в)



г)

а, б, в, г – $r_n/R_6 = 0,2$, $r_n/R_6 = 0,4$, $r_n/R_6 = 0,6$, $r_n/R_6 = 1,0$ соответственно

Рисунок 2.7 – Влияние r_0/R_6 и $K_{выт}$ при $n=0,1$ на толщину заготовки после вытяжки в опасном сечении



а, б, в, г – $r_n/R_6 = 0,2$, $r_n/R_6 = 0,4$, $r_n/R_6 = 0,6$, $r_n/R_6 = 1,0$ соответственно

Рисунок 2.8 – Влияние r_0/R_6 и $K_{B_{\text{выт}}}$ при $n=0,1$ на положение сечения с относительной координатой $R_{\min}/R_6$ у заготовки после вытяжки

Получаемый в этом случае характер распределения толщин вдоль образующей цилиндрической заготовки монотонен (рисунок 2.9).

Для получения рассматриваемой группы деталей необязательно получать данный характер распределения толщин, поскольку в этом случае в ходе обжима накапливаются значительные деформации на участке, соответствующем переходу от дна к стенке цилиндрической заготовки. Полученная в последнем случае деталь имеет значительное утолщение в

центральной части образующей. Для проектирования технологического процесса необходимо использовать заготовки с отношением $r_n/R_6 \leq 0,4$.

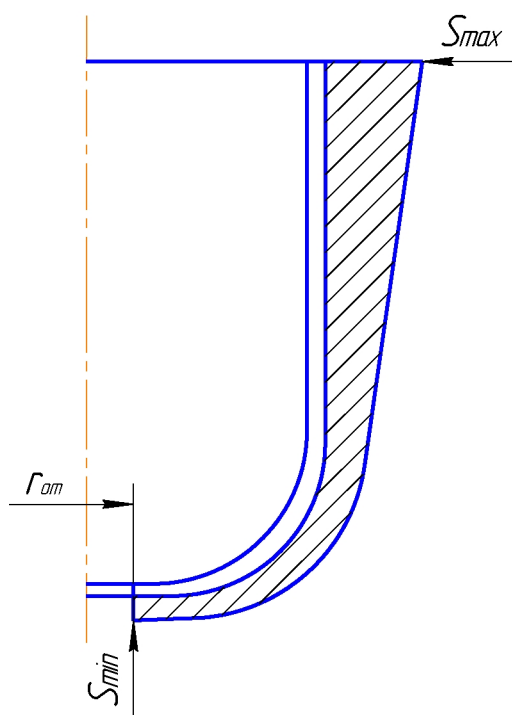


Рисунок 2.9 – Эпюра, получаемая при $r_n/R_6 > 0,6$ и $r_0/R_6 > 0,25$

2.1 Оценка длины образующей при вытяжке кольцевой заготовки

С помощью программы DEFORM была выполнена оценка изменения длины образующей при вытяжке кольцевой заготовки. Полученные результаты приведены в таблице 2.1. Данные приведены для коэффициента трения 0,12 и материала с $n=0,1$.

Как видно из таблицы 2.1, изменение длины на донном участке (l_{13}/l_1) в ходе вытяжки кольцевой заготовки составляет не более 5% при рассматриваемых параметрах процесса, в то время как ее изменение на свободном и фланцевом участках составляет до 16%. Данные, приводимые в таблице 2.1, позволяют использовать допущение о постоянстве длины образующей на донном участке для расчета технологических параметров процесса по аналитической модели.

Для расчета технологических параметров на свободном и фланцевом участках более точным будет являться использование допущения о постоянстве площади поверхности заготовки.

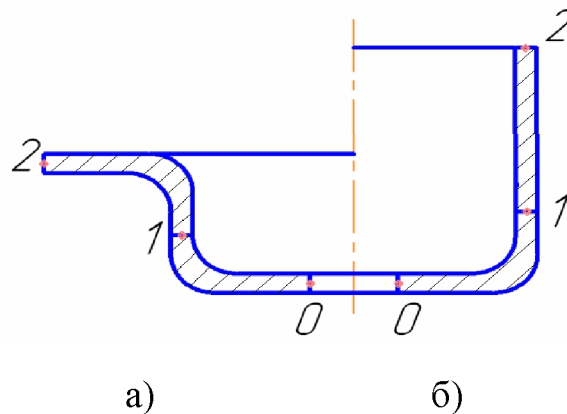
Таблица 2.1 – Изменение относительной длины всей образующей $((R_0 - r_0)/l_2)$ и относительной длины донного участка образующей (l_{13}/l_1) при вытяжке кольцевой заготовки

n	r_0/R_0	$r_{П}/R_0$	К _{выт}	$(R_0 - r_0)/l_2$	l_{13}/l_1
0,1	0,12	0,2	1,95	0,84	0,99
			1,65	0,92	1,01
		0,6	1,95	0,85	0,96
			1,65	0,91	0,96
	0,3	0,2	1,95	0,86	1,04
			1,65	0,93	1,03
		0,6	1,95	0,84	0,98
			1,65	0,91	0,99
0,5	0,12	0,2	1,95	0,85	0,98
			1,65	0,92	1,01
		0,6	1,95	0,84	0,95
			1,65	0,91	0,97
	0,3	0,2	1,95	Отбортовка	
			1,65	0,93	1,04
		0,6	1,95	0,85	0,98
			1,65	0,92	0,98

В соответствии с принятыми выше допущениями, зависимости, определяющие распределение толщин у заготовки после вытяжки, определены для трех участков. При этом считалось, что формообразование на участке 0-1 завершалось в момент достижения наибольшего усилия

процесса, т.е. считалось, что после достижения наибольшего усилия процесса толщина заготовки в донной и цилиндрической части более не изменялась (рисунок 2.10). Для описания деформаций по толщине вдоль образующей заготовки после вытяжки использовали полином второй степени.

Значения параметров полинома определены с помощью значений деформаций по толщине в трех точках. В качестве таких характерных точек выбраны точки на кромках отверстия и фланца, а также в центральной части свободного участка (рисунок 2.10).

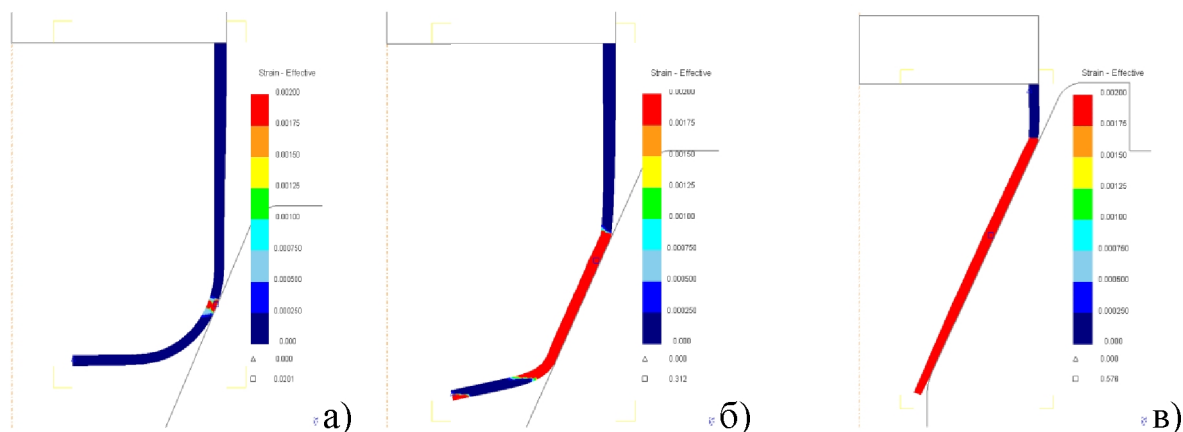


а – в момент достижения наибольшего усилия, б – по окончании процесса

Рисунок 2.10 – Положение характерных точек

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИМА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ DEFORM

Исследование развития очага пластических деформаций при обжиге цилиндрической заготовки с отверстием также выполнено с помощью программы DEFORM. Последовательность изменения размеров и формы очага пластических деформаций показана на рисунке 3.1.



а, б, в – начальный, промежуточный и заключительный этапы деформирования заготовки при обжиге соответственно

Рисунок 3.1 – Последовательность изменения размеров и формы очага пластических деформаций у заготовки с $r_0/R_0 = 0,2$

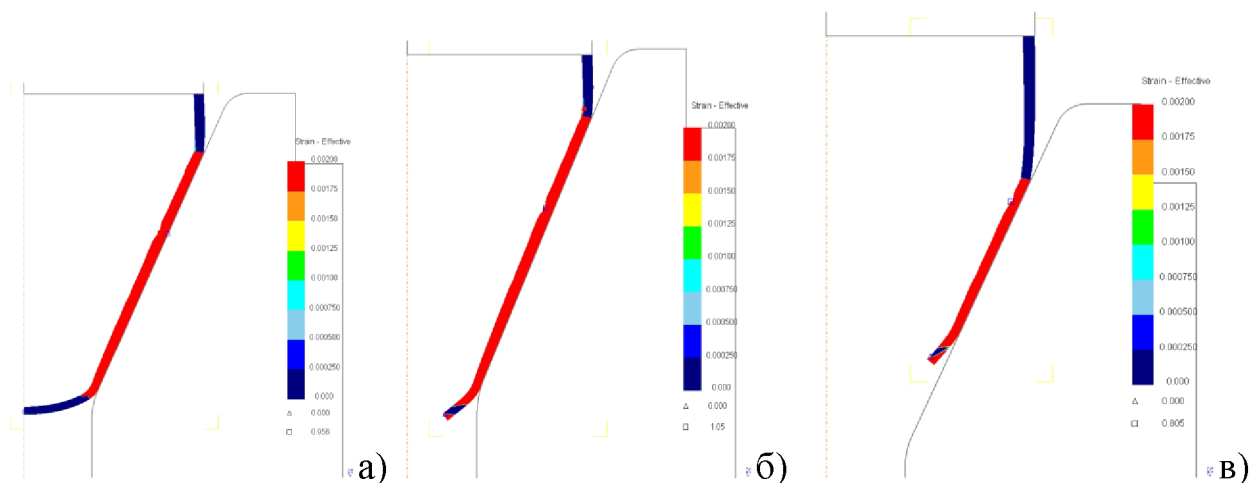
Как видно из рисунка 3.1, отличие обжима цилиндрической заготовки с отверстием от обжима трубной заготовки заключается в том, что пластическое деформирование заготовки начинается с центральной части (радиусного участка), по мере перемещения пуансона очаг пластических деформаций охватывает участки заготовки, примыкающие первоначально к точке касания инструмента с заготовкой. При этом скорость его роста в направлении стенки и дна различна и определяется геометрическими характеристиками обжимной матрицы (ее углом конусности).

На рост очага деформации в направлении дна оказывает влияние размер отверстия, поскольку при больших размерах отверстия сопротивление деформированию со стороны дна меньше, чем при малых его значениях.

На рисунке 3.2 показаны заключительные моменты обжима цилиндрической заготовки без отверстия и с отверстием с размером $r_{om}/R_6 = 0,12$ и $r_{om}/R_6 = 0,50$ соответственно.

Как видно из рисунка 3.2, на кромке отверстия обжимаемой цилиндрической заготовки действует изгибающий момент, стремящийся прижать кромку отверстия к обжимной матрице. Действие данного усилия вызывает появление деформаций, близких по величине к $\varepsilon_i = 0,2\%$, что отражено на графиках. С другой стороны, величины возникающих напряжений слишком мало отличаются от $\sigma_{0,2}$, поэтому отбортовки кромки отверстия не происходит.

Из рисунка 3.2 также видно, что в донной части заготовки практически до момента касания инструмента существует область упругих деформаций, что позволяет сделать вывод о том, что влиянием изгибающего момента на увеличение размера отверстия можно пренебречь.



а – без отверстия; б – с отверстием в донной части, равным 0,2 от R_6 ;

в – с отверстием в донной части с размером 0,5 от R_6

Рисунок 3.2 – Области с интенсивностью деформаций более 0,2% при обжиге цилиндрической заготовки в заключительный момент деформирования

С помощью вычислительного эксперимента без грубой схематизации процесса был проведен анализ влияния размера отверстия, выполняемого в заготовке, на распределении толщин у получаемой заготовки (рисунок 3.3).

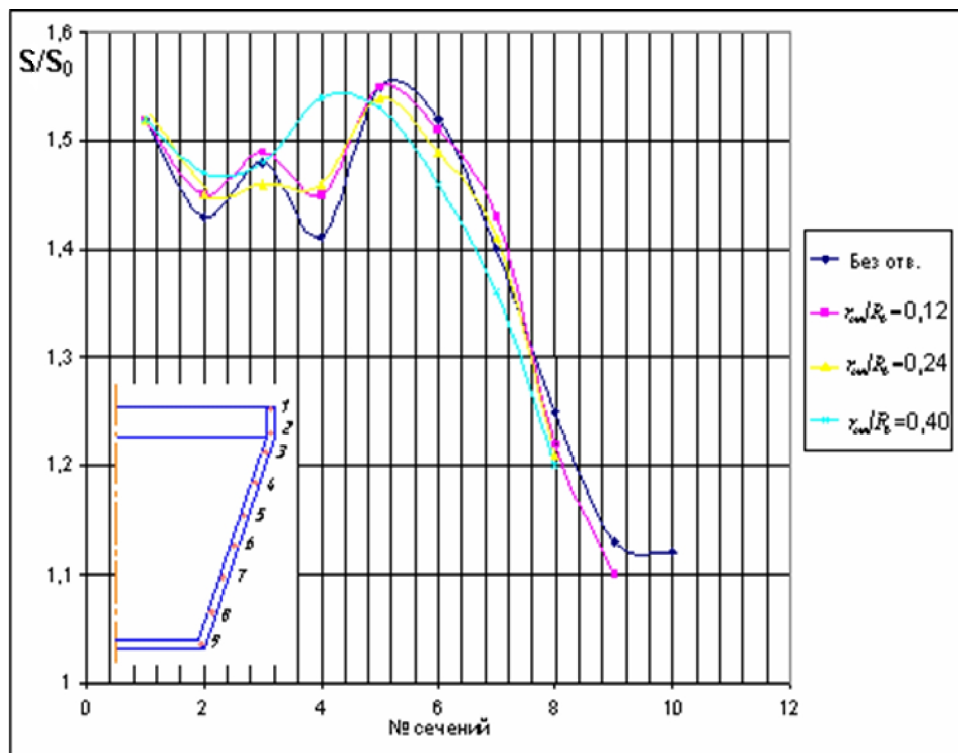


Рисунок 3.3 – Изменение толщин по сечениям деформируемой заготовки в зависимости от относительного размера выполненного отверстия ($r_{от} / R_o$)

Из рисунка 3.3, видно, что увеличение размера отверстия в донной части цилиндрической заготовки на набор толщины при обжиге существенного влияния не оказывает.

3.1 Изменение длины образующей при обжиге цилиндрической заготовки с отверстием

В таблицах 3.1 и 3.2 приведены результаты изменения длины образующей цилиндрической заготовки при обжиге.

Как видно из таблиц 3.1 и 3.2, с точностью до 6% можно считать, что длина образующей при обжиге не изменяется.

Таблица 3.1 – Изменение длины образующей цилиндрической заготовки

$$с K_{выт} = 1,95, \frac{r_n}{R_0} = 0,4, n = 0,1 \text{ при обжиге с } \gamma = 25^\circ$$

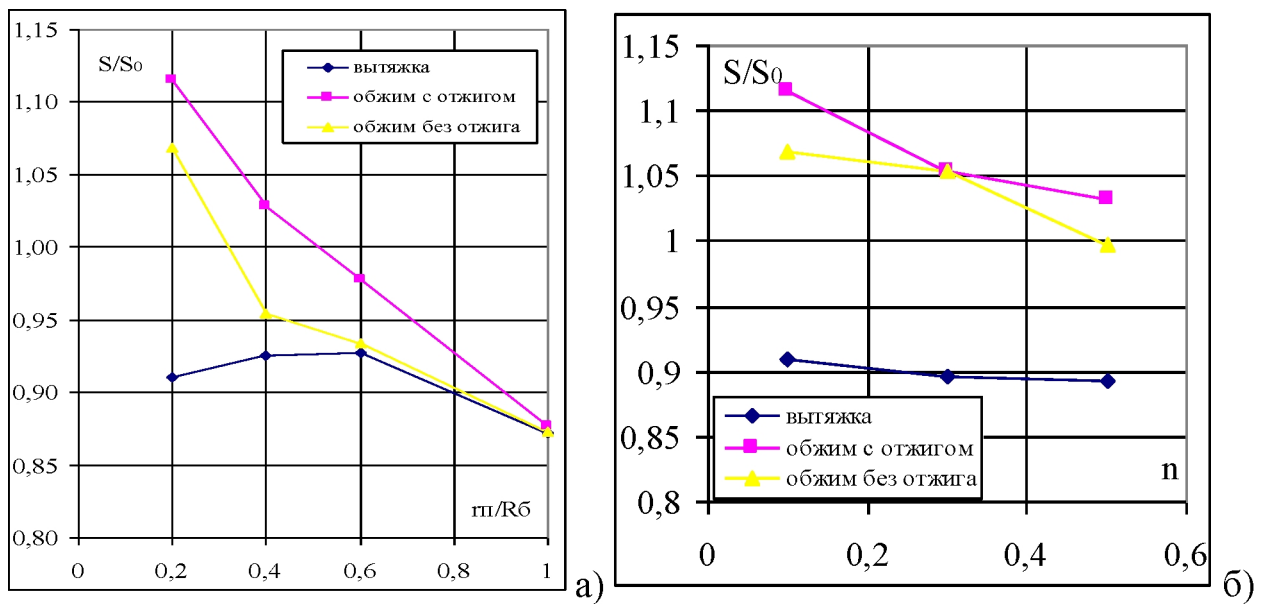
r_{om}/R_0	0,6	0,5	0,4
Изменение длины образующей	0,96	0,97	0,99

Таблица 3.2 – Изменение длины образующей цилиндрической заготовки
с $K_{выт} = 1,95, r_n/R_0 = 0,4, n = 0,1, r_0/R_0 = 0,6$ при обжиге в матрицы с разными γ

γ	15°	20°	25°	30°	35°	40°
Изменение длины образующей	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	4	4	6	6	6	6

3.2 Влияние межоперационного отжига на обжим цилиндрической заготовки с отверстием

При исследовании обжима было установлено влияние отжига на процесс набора толщины стенки заготовки. Для этого были поставлены две группы вычислительных экспериментов. Для одной группы экспериментов использовалась цилиндрическая заготовка с полученными значениями деформаций и напряжений после вытяжки, для другой – использовались заготовки, у которых была перестроена сетка конечных элементов с такими условиями, что поля напряжений и деформаций оставшиеся после вытяжки не учитывались. Во втором случае считалось, что цилиндрическая заготовка, используемая для обжима, прошла отжиг (рисунок 3.4).



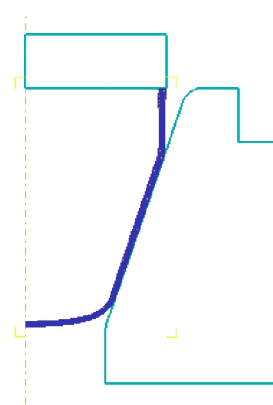
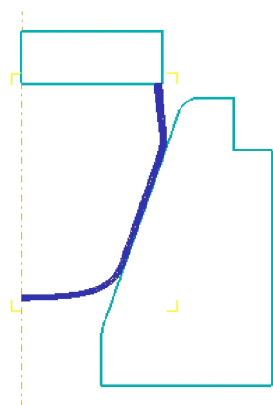
а – в зависимости от относительного скругления пуансона при $n=0.14$; б – в зависимости от n при $r_n/R_6 = 0.2$

Рисунок 3.4 – Влияние отжига на набор толщины полуфабриката в опасном сечении при обжиге для случая, когда, $r_0/R_6 = 0$, $K_{выт} = 1.95$

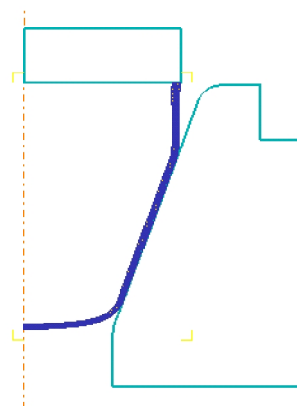
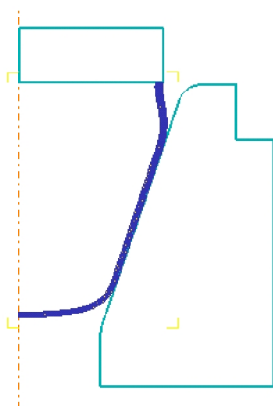
Как видно из рисунка 3.4, отжиг не оказывает значительного влияния на утолщение заготовки.

Для объективной оценки влияния отжига на форму и размеры получаемой детали на рисунке 3.5 показаны форма получаемых изделий при $r_n/R_6 = 0.2$, $K_{выт} = 1.95$ и $r_n/R_6 = 1$ при $K_{выт} = 1.95$ в зависимости от различных свойств материала.

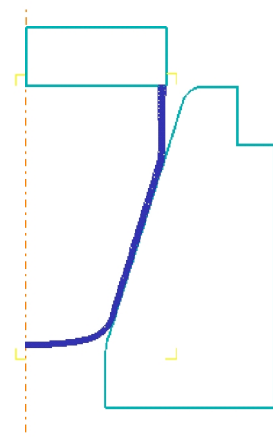
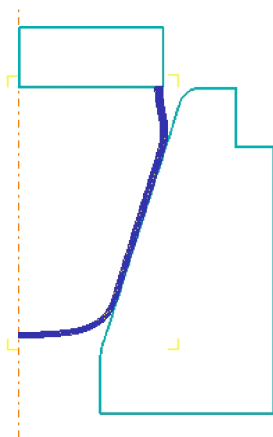
Как видно из рисунка 3.5, на цилиндрическом участке наблюдается потеря устойчивости заготовки.



а)



б)



с отжигом

в)

без отжига

а, б, в – при $n=0,1; 0,3; 0,5$ соответственно

Рисунок 3.5 – Влияние свойств материала на форму получаемой детали
при $\pi p/R\delta = 0,2$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные свидетельствуют о том, что использование программного обеспечения позволяет значительно упростить аналитическое решение задач обработки металлов давлением, за счет получения дополнительных допущений.

Рассмотренные примеры исследования процессов вытяжки кольцевой заготовки последующего обжима полученного вытяжкой полуфабриката показали высокую информативность получаемых в программе DEFORM данных.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 www.economy.gov.ru [электронный ресурс] – сайт министерства экономического развития Российской Федерации
- 2 www.rian.ru [электронный ресурс] – сайт российского информационного агентства
- 3 Ковка и штамповка / Семёнов Е. И / Справочник по холодной штамповке оболочковых деталей. – М. : Машиностроение, 1987. – 544 с., ил.
- 4 Мельников Э. Л. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2003. – 288 с., ил.
- 5 Способ изготовления полых изделий : пат. 889205: МПК В 21 D 22/30 / Берлет Ю. Н., Мкрасов А. Ш., Макаров В. Ф. ; 1990.
- 6 Применение газостатической обработки для регулирования структуры литых полуфабрикатов из титановых сплавов / Н.Ф. Аношкин, Е.К. Введенская, Б.А. Копелевич и др. М.: ВИЛС, 1991. с.299-307
- 7 Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст]/ И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа. 1970. – 190 с.
- 8 Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / С.А. Вьюнов, Ю.И. Гусев, А.В. Карпов и др.; под общ. Ред. Д.В. Хромина. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
- 9 Штамповка резиной и вытяжкой / Исаченков Е. И. – М. : Машиностроение, 1967. – 367с., ил.
- 10 Справочник по холодной штамповке / Романовский В. П. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отделение, 1979. – 520 с., ил.
- 11 Исследование процесса штамповки оболочек вытяжкой и обжимом : диссертация на соискание степени канд. техн. наук / Маслов В.Д. 1980

- 12 Технология и автоматизация листовой штамповки : Учебник для вузов / Попов Е. А., Ковалёв Е. Г., Шубин И. Н. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2000. – 480 с., ил
- 13 Основы теории листовой штамповки : Учебное пособие для вузов / Попов Е. А. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с., ил.
- 14 Способ получения переходников с внутренним цилиндрическим пояском : пат. 2060086: МПК В 21 D 41/00 / Евсюков С.А.; 1996
- 15 Способ изготовления тонкостенных осесимметричных деталей из трубных заготовок :пат 1074634 : МПК В 21 D 41/04 / Соколовский В.И., Филимонов И.Е., Бачевский Н.И., Каржавин В.В. 1984.
- 16 Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Исаченков Е. И. – М. : Машиностроение, 1978. – 208 с., ил.

Учебное издание

Шляпугин Алексей Геннадьевич

Гречников Федор Васильевич

Попов Игорь Петрович

Хардин Михаил Викторович

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ
ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ
СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ**

Учебное пособие

Научный редактор

Редакторская обработка

Корректорская обработка

Компьютерная верстка: А.Г. Шляпугин

Самарский государственный

аэрокосмический университет.

443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного

Аэрокосмического университета

443086, Самара, Московское шоссе, 34