МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Е.Г. ДЕМЬЯНЕНКО, И.П. ПОПОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Часть 1

СПОСОБЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРОЦЕССАХ ФОРМОВКИ, ОТБОРТОВКИ И ВЫТЯЖКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве учебника для студентов, обучающихся по программе высшего профессионального образования по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением»

САМАРА
Издательство СГАУ
2011

УДК 621.73(075)
ББК 34.623я7
Д32

Рецензенты: д-р тех. наук, профессор В. Г. С м и р н о в;
д-р тех. наук, профессор А. А. М а к а р о в

Демьяненко, Е.Г.
Д32 **Технология листовой штамповки: в 2 ч. Ч. 1. Способы деформирования, основанные на процессах формовки, отбортовки и вытяжки тонкостенных осесимметричных деталей**: учеб. для вузов / *Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов.*– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 112 с.

ISBN 978-5-7883-0902-6

Обоснована разработка новых способов для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы и создание ресурсосберегающих технологий, повышающих производительность труда, качество продукции, что является важнейшей задачей современной промышленности.

Приведены сведения о прогрессивных способах пластического деформирования тонкостенных осесимметричных заготовок в условиях всестороннего растяжения для деталей усеченной сужающейся формы. Кратко рассмотрены и проанализированы известные процессы формообразования подобных деталей.

Для инженерно-технических работников, студентов, магистров и преподавателей вузов, специализирующихся в технологии листовой штамповки.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

УДК 621.73(075)
ББК 34.623я7

ISBN 978-5-7883-0902-6

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

Содержание

Основные условные обозначения **5**

Введение **6**

1 Анализ существующих способов изготовления тонкостенных осесимметричных деталей **9**

1.1 Классификация оболочек по конструктивно-геометрическому признаку **11**

1.2 Способы получения тонкостенных осесимметричных деталей 13

1.2.1 Специальные способы получения тонкостенных деталей 13

1.2.2 Способы инструментальной штамповки получения тонкостенных деталей 21

2 Теоретический анализ процесса формовки **47**

2.1 Механизм нового способа формовки и условие минимальной разнотолщинности детали **47**

2.2 Анализ напряженно-деформированного состояния процесса формовки **50**

2.2.1 Основные допущения 50

2.2.1.1 Допущение о плоско-деформированном состоянии 50

2.2.1.2 Учет упрочнения 56

2.2.1.3 Допущение о создаваемом давлении эластичным элементом 58

2.2.1.4 Традиционные допущения 59

2.2.2 Определение напряжений и деформаций процесса 59

2.3 Определение технологических и предельных параметров процесса формовки для получения тонкостенных осесимметричных деталей с постоянной толщиной стенки **66**

2.3.1 Определение усилия процесса формовки и усилия прижима 66

2.3.2 Определение величины критической степени деформаций 69

2.4 Теоретическая оценка применимости способа с использованием эластичного элемента **69**

2.4.1 Формовка выпуклой детали 69

2.4.2 Формовка вогнутой детали 71

2.4.3 Формовка вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой детали 74

2.4.4 Формовка вогнуто-конической и выпукло-конической детали 75

2.5 Теоретическая оценка применимости способа при отсутствии эластичного элемента **76**

2.5.1 Формовка выпуклой детали 76

2.5.2 Формовка конической детали 77

3 Анализ процесса отбортовки плоской кольцевой заготовки в коническую деталь **78**

3.1 Определение толщины детали **78**

3.2 Определение относительной высоты детали **81**

4 Анализ способа, совмещающего процессы формовки и вытяжки **84**

4.1 Определение напряжений при вытяжке, обеспечивающих процесс формовки на коническом участке **85**

4.2 Определение предельных параметров процесса формовки, совмещённой с вытяжкой **87**

5 Анализ способа, совмещающего последовательно процессы формовки и отбортовки **91**

5.1 Механизм способа формовки и отбортовки **91**

5.2 Теоретический анализ способа последовательного совмещения процессов формовки-отбортовки **93**

6 Анализ процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов **97**

6.1 Механизм процесса формовки **97**

6.2 Теоретический анализ процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов **100**

Список использованных источников **104**

Основные условные обозначения

R - радиус большего основания детали, мм;

r - радиус меньшего основания детали, мм;

D - диаметр большего основания детали, мм;

d - диаметр меньшего основания детали, мм;

$S_{зад}$ - заданная толщина детали, мм;

S_T - технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки, мм;

$\alpha_{заг}$ - угол конусности заготовки, град;

$\alpha_{дет}$ - угол конусности полученной детали, град;

$V_{заг}$, $V_{дет}$ - объем заготовки, объем детали, мм^3;

$F_{заг}$, $F_{дет}$ - площадь заготовки, площадь детали, мм^2;

$S_{заг}$, $S_{дет}$ - толщина заготовки, толщина детали, мм;

e_i - интенсивность деформаций;

$П$ - модуль упрочнения;

σ_S - напряжение текучести, МПа;

σ_{T_0} - экстраполированный предел текучести, МПа;

k - коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента, 1/мм;

$\sigma_в$ - предел прочности, МПа;

σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении, МПа;

σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении, МПа;

f - коэффициент трения между поверхностями матрицы и заготовки;

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;

R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении, мм;

R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении, мм;

q - давление, создаваемое эластичным элементом, МПа;

e_S - деформация по толщине;

e_ρ - деформация в меридиональном направлении;

e_θ - деформация в тангенциальном направлении;

b - коэффициент утонения материала;

n, A - показатели механических свойств материала;

$\sigma_ш$ - напряжения в момент появления шейки, МПа;

$d_з$ - диаметр меньшего основания заготовки с учетом припуска под зажимы, мм;

$D_з$ - диаметр большего основания заготовки с учетом припуска под зажимы, мм.

Введение

Актуальность темы. Современные тенденции развития различных отраслей промышленности стимулируют разработку высокоэффективных и конкурентоспособных видов техники и технологий, обеспечивающих жесткие требования к качеству и эксплуатационным свойствам изделий при экономии материальных и энергетических ресурсов, трудовых затрат, снижении себестоимости производства, что актуально для машиностроения.

Типовыми изделиями ракетно-космической и авиационной индустрии являются корпусные оболочки из листовых заготовок (обшивки отсеков, обтекатели, топливные баки различных форм и размеров, баллоны хранения газов, сопловые оболочки, оболочки камер сгорания двигателей и др.). К ним предъявляются высокие конструкторские требования, определяющие технологическую возможность изготовления детали: геометрическая точность, качество поверхности, механические свойства, равномерная толщина, надежность в эксплуатации [22].

При этом условно тонкостенными будем считать те детали, у которых $\frac{S_{заг}}{D} < 0,008$. В дальнейшем рассматриваются тонкостенные осесимметричные детали усеченной сужающейся формы с относительной высотой H: $0,5 < \frac{H}{D} \le 0,7$ и отношением диаметров: $\frac{D}{d} = 1,7 \div 2,2$.

Задача технолога состоит в том, чтобы спроектировать технологический процесс с минимальным числом переходов, высоким коэффициентом использования материала, точными геометрическими параметрами. Кроме того, полученная деталь должна удовлетворять заданным эксплуатационным характеристикам. При достижении этого результата важно учитывать разнотолщинность получаемых деталей в листовой штамповке. Известно, например, что разнотолщинность многократной вытяжки составляет 50-100%. Это является одной из основных причин уменьшения степени формообразования на последующих операциях

штамповки, снижения коэффициента использования материала, т.к. не всегда полученный характер изменения толщины, ее величина на штампованной детали соответствуют требуемым характеристикам. Во избежание этого исходную толщину заготовки выбирают завышенной на определенную величину разнотолщинности. Для деталей авиационной техники, подвергающихся механической обработке, возрастает трудоемкость изготовления и затраты материала из-за увеличения количества металла, снимаемого в стружку. Поэтому с технической и экономической точек зрения очень важно проектировать технологический процесс так, чтобы он направленно изменял толщину заготовки.

Удовлетворить требования, предъявляемые к деталям авиационной техники, возможно, если аналитически представить условие, являющееся функционалом, и затем его решить [74]. Функционал требует приближения технологически возможной толщины S_T к заданной толщине детали $S_{зад}$ при условии минимального отклонения как со стороны положительной, так и отрицательной разницы между двумя функциями толщин.

В первую очередь, условие можно выполнить последовательным совмещением разных схем напряженно-деформированного состояния для всей заготовки или отдельных ее участков как в однопереходных, так и многопереходных процессах. Такой подход, во-первых, дает возможность вести формоизменение на каждой операции с максимальными коэффициентами даже для деталей, имеющих жесткие ограничения по толщине стенки. Это объясняется тем, что, накладывая на элементы заготовки разные схемы напряженно-деформированного состояния, на последующих операциях можно компенсировать полученное ранее утонение или утолщение. Во-вторых, применять техпроцессы с более высоким коэффициентом использования металла.

Во вторую очередь, направленно изменять толщину заготовки, приближая ее к заданной, возможно путем использования технологических параметров процесса: исходных размеров заготовки, трения, геометрии

инструмента, граничных условий. Наиболее эффективны при таком подходе способы формовки из тонкостенных конических заготовок. Однако, им присущ ряд недостатков как в конструктивном плане, так и вследствие отсутствия методик проектирования. Таким образом, разработка методик проектирования новых способов из конических заготовок, совершенствование устройств для формообразования, которые повышают качество за счет равномерности толщины стенки и точности профиля, являются актуальными.

1 Анализ существующих способов изготовления тонкостенных осесимметричных деталей

Тонкостенные оболочки двойной кривизны имеют широкое распространение в изделиях аэрокосмической техники и отличаются большим разнообразием форм и размеров. Наиболее распространенными являются осесимметричные оболочки усеченной сужающейся формы. Большое количество существующих в настоящее время способов формообразования деталей для получения таких оболочек характеризуют этот класс деталей как наиболее сложный и трудоемкий в изготовлении. Наряду с предъявляемыми к ним высокими требованиями по точности геометрической формы, диаметральным размерам, толщине стенки, качеству поверхности и механическим свойствам, связанными с обеспечением надежности эксплуатации деталей в условиях агрессивной среды, высоких температур и давлений, возникает необходимость совершенствования методов их изготовления. При этом приходится учитывать принцип построения процесса, основанный на выборе вида среды рабочих частей штампов - твердой, жидкой, эластичной, газообразной, смешанной, а также силовое воздействие на заготовку в процессе ее формообразования независимо от вида среды рабочих частей штампов и других признаков.

Известны следующие процессы штамповки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы, определяемые схемой напряженно-деформируемого состояния заготовки в процессе ее формообразования (независимо от вида среды рабочих частей штампов): вытяжка (60% всех штампуемых деталей), формовка (15%), обжим (7%), ротационная вытяжка (6%), обтяжка (4%). Для изготовления применяются самые различные материалы: алюминиевые и магниевые сплавы, жаропрочные и нержавеющие стали, титан и др. Конструкция деталей предусматривает один, два и более сварных швов по образующей, что позволяет применять при их изготовлении различные технологические процессы. Для получения тонкостенных осесимметричных деталей

используется множество способов, но многие из них могут требовать или уникального оборудования и оснастки (штамповка взрывом, электрогидроштамповка и др.), или не обеспечивают заданной точности контура штампованной детали, т.е. имеют свои преимущества и недостатки. Решение названной проблемы обеспечивается созданием новых и усовершенствованием существующих процессов холодной и горячей обработки давлением с учетом свойств и поведения материалов.

Область применения тонкостенных осесимметричных деталей представлена на рисунках 1.1, 1.2, 1.3, 1.4.

Рисунок 1.1 – Сопло, сплав ОТ4 (элемент камеры сгорания), габаритные размеры: диаметр – 500 мм; толщина – 2...3 мм

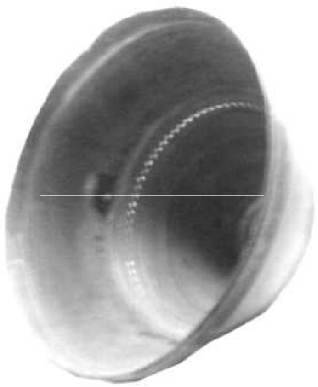

Рисунок 1.2 – Часть сопла, сплав ОТ4 (элемент камеры сгорания), габаритные размеры: диаметр – 500 мм; толщина – 2...3 мм

Рисунок 1.3 – Деталь «Рюмка», сплав 4В (элемент камеры сгорания), габаритные размеры: диаметр – 500 мм; толщина – 2...3 мм

Рисунок 1.4 – Штамповка оболочки бытового отсека, алюминиевый сплав АД1, габаритные размеры: диаметр – 2500 мм; высота – 1500 мм; толщина – 2...3 мм

1.1 Классификация оболочек по конструктивно-геометрическому признаку

Проведенный анализ использования тонкостенных осесимметричных деталей привел к необходимости их классификации. Из всех признаков, которые кладут в основу классификации (геометрические, механические свойства металла, технология изготовления и т.д.), неизменным является конструктивно-геометрический признак, так как конструктивно-геометрические формы стабильны и не подвержены изменениям в зависимости от вида и технических возможностей производства [42].

К конструкторским требованиям, ограничивающим технологическую возможность изготовления детали, в основном относятся высокие требования

к геометрической точности детали, в том числе и к относительной толщине заготовки. При этом условно тонкостенными будем считать те детали, у которых $\frac{S_{заг}}{D} < 0,008$ [76] (рассматриваемая относительная высота H: $0,5 < \frac{H}{D} \le 0,7$ и отношение диаметров: $\frac{D}{d} = 1,7 \div 2,2$).

На рисунке 1.5 приведена классификация по геометрическому признаку – по форме в соответствии с основными конструктивными понятиями.

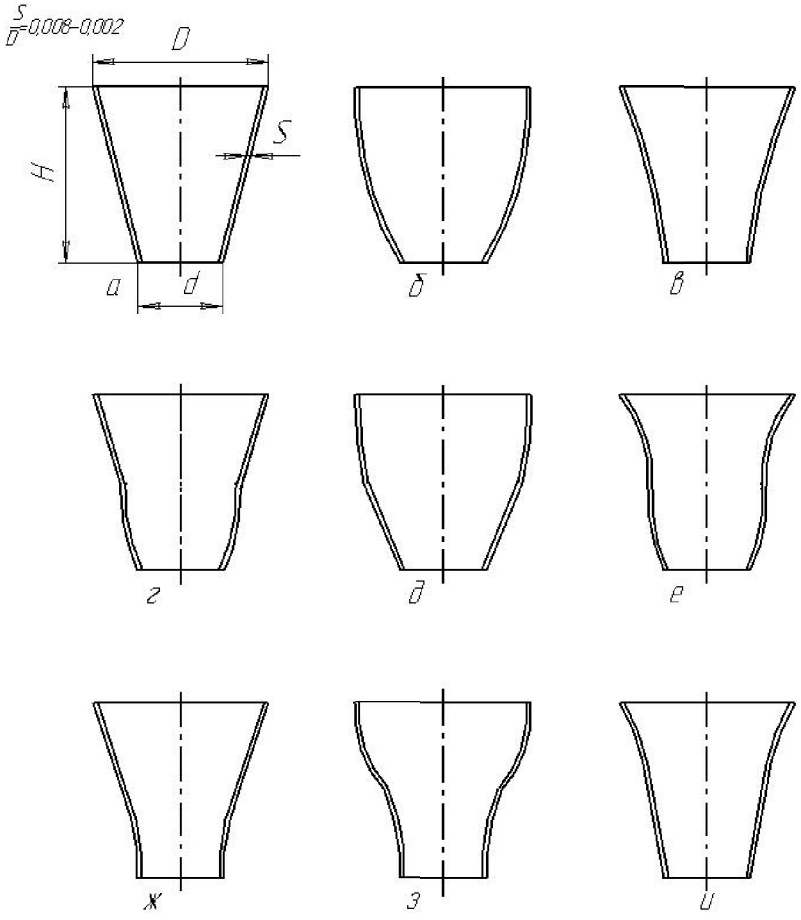

Рисунок 1.5 – Типовые контуры деталей:
а – коническая форма; *б* – выпуклая форма; *в* – вогнутая форма; *г* – коническо-выпуклая форма; *д* – выпукло-коническая форма; *е* – вогнуто-выпуклая форма; *ж* – коническо-вогнутая форма; *з* – выпукло-вогнутая форма; *и* – вогнуто-коническая форма

Для деталей ракетно-космической и авиационной техники образующая заготовки может быть задана в виде функций, таблицы, которые с достаточной точностью для анализа процесса могут быть приведены к

радиусу в меридиональном направлении R_ρ, связанному с другими геометрическими параметрами (см. рисунок 1.6).

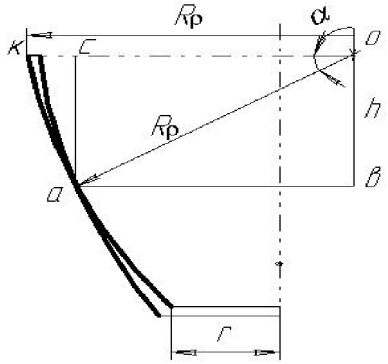

Рисунок 1.6 – Основные геометрические размеры деталей:
a – произвольный элемент, выбранный на образующей заготовки; R_ρ – радиус детали в меридиональном направлении; r – радиус меньшего основания заготовки; h – расстояние от большего основания детали до рассматриваемого элемента; α – угол, образованный кромкой детали большего основания и радиусом, проведенным в меридиональном направлении в точку рассматриваемого элемента

С учетом сказанного:

$$\left(R_\rho - kc\right)^2 + h^2 = R_\rho^2, \tag{1.1}$$

где $kc = R_\rho - R_\rho \cdot \cos\alpha$. (1.2)

Запишем формулу (1.1) с учетом (1.2) и выразим из нее радиус кривизны:

$$R_\rho = \sqrt{\frac{h}{\sin\alpha}}.$$

1.2 Способы получения тонкостенных осесимметричных деталей

1.2.1 Специальные способы получения тонкостенных деталей

К ним относятся все способы, которые отличны от инструментальной штамповки [24]: с применением эластичных и гидравлических сред, взрывчатых веществ, ротационная вытяжка, магнитно-импульсная штамповка и т.д.

- Так штамповка взрывом заключается в деформировании конической заготовки, помещенной в матрицу, импульсной нагрузкой от взрыва. Использование процесса рекомендуется для изготовления крупногабаритных изделий с большой толщиной стенок из высокопрочных материалов. При простоте и низкой стоимости оснастки процесс отличается длительным рабочим циклом, особыми требованиями по технике безопасности [63], разнотолщинностью.

- При электрогидравлической штамповке коническая заготовка, установленная в матрице и залитая жидкостью, деформируется под действием ударной волны, образующейся при высоковольтном разряде между электродами, помещенными в жидкость. Процесс отличается сложностью правил и мер безопасности при необходимости в специальном оборудовании [77] и разнотолщинностью.

- Для получения глубоких деталей конической, выпуклой формы применима магнитно-импульсная штамповка. Детали штампуются из конических заготовок по жесткой матрице импульсным воздействием магнитного поля, деформирующего заготовку. В данном процессе отпадает необходимость в дорогостоящем прессовом оборудовании, не требуется передающая среда. Недостатками магнитно-импульсной штамповки являются высокие требования техники безопасности и специальные приемы для штамповки деталей из металлов с низкой электропроводностью. В работе [40] поставлена и решается задача определения оптимальной толщины стенки заготовки при импульсной штамповке осесимметричных деталей выпуклой формы, при которой могла бы быть обеспечена равнотолщинность стенки детали после штамповки без ее последующей обработки. Все перечисленные способы не позволяют обеспечить получение равномерной толщины изделия [21,79].

- Эластичной средой выпуклые детали штампуются, как правило, из сварных конических заготовок. Характерной особенностью способа формообразования пространственной (конической заготовки) по жесткой

матрице [23,42] является наличие осевой силы, вызывающей значительные сжимающие напряжения вдоль образующей стенки конической заготовки. Под действием этих напряжений стенка детали при определенных соотношениях конусности и толщины заготовки начинает терять устойчивость, что приводит к браку изделия за счет поперечных складок (волн) в стенке детали. При формообразовании деталей конусообразной формы наиболее опасным участком является вершина конуса, поскольку это место испытывает действие наибольших сжимающих напряжений. Сжимающие напряжения в меридиональном направлении σ_ρ, действующие вдоль образующей заготовки, при достижении некоторых критических значений приводят к упомянутой потере устойчивости стенки заготовки и возникновению поперечных складок. Такие складки или гофры являются неисправимым браком. Возможным способом предотвращения потери устойчивости является локализация действия деформирующих сил, т.е. оптимизация воздействия инструмента на заготовку за счет конструкции эластичного инструмента [10,58,59]. На рисунке 1.7 представлена схема такого процесса штамповки деталей выпуклой формы.

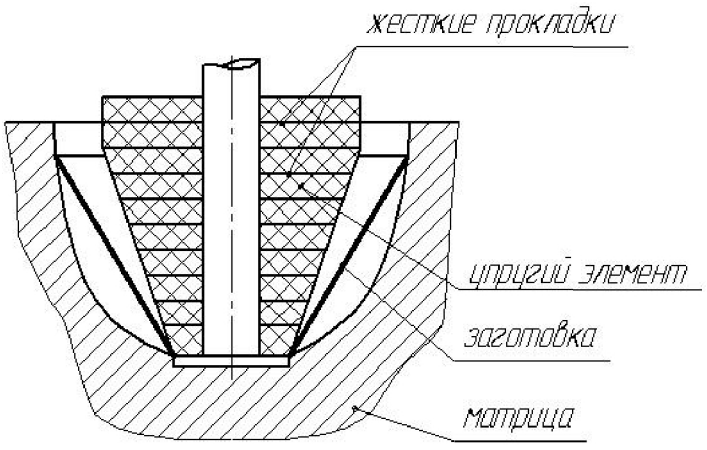

Рисунок 1.7 – Процесс штамповки деталей эластичным инструментом

Сущность способа заключается в последовательном деформировании заготовки в форме направленной волны. При этом в начале процесса

локальным давлением эластичной среды формируется небольшой участок заготовки, величина которого обеспечивает устойчивость без складкообразования. С нарастанием усилия пресса зона нагружения заготовки и очаг деформирования последовательно распространяются вдоль оси заготовки до полного оформления детали по контуру матрицы. Такая схема процесса осуществляется в течение одного хода пресса при использовании пуансона, состоящего из кольцевых эластичных элементов (шайб) с различными характеристиками сжатия, т.е. с переменной жесткостью на сжатие. При этом в верхней части пуансона должны располагаться эластичные шайбы с большей жесткостью, а размеры пуансона в исходном положении должны обеспечивать нарастающий кверху зазор между заготовкой и пуансоном. Необходимое увеличение жесткости в верхней части пуансона достигается за счет применения более твердых марок эластичных сред или уменьшения толщины эластичных шайб с постановкой между ними металлических прокладок. В процессе формования детали таким пуансоном в каждый данный момент времени деформируется небольшой участок заготовки с размерами, не допускающими потери устойчивости. Часть заготовки, лежащая ниже этого участка, является уже отформованной и прижатой эластичной средой к матрице, а верхняя часть еще не контактирует с пуансоном. Она в процессе формовки свободно подтягивается в зону деформирования, что снижает утонение стенки детали и увеличивает предельную степень формоизменения заготовки за один переход [20]. Однако не исключена для тонких заготовок потеря устойчивости свободной части, так как она деформируется в условиях напряженно-деформируемой схемы близкой к процессу вытяжки, где действуют сжимающие тангенциальные напряжения.

- В последние годы широкое применение находит ротационная вытяжка на специализированном оборудовании с использованием в качестве деформирующих элементов роликов. Ротационная вытяжка представляет собой процесс формоизменения плоских или полых вращающихся заготовок

по профилю оправки с помощью перемещающейся деформирующей нагрузки. Процесс характерен наличием локального очага деформации, образующегося в результате воздействия давильного элемента (ролика) на материал заготовки. Реализация локализированной деформирующей нагрузки при ротационной вытяжке позволяет получать за один проход высокие степени деформации (до 80%), что делает процесс экономически выгодным по сравнению с другими способами изготовления деталей, например штамповкой. С помощью ротационной вытяжки получают полые детали с постоянной и переменной толщиной стенки, имеющие широкий диапазон размеров (диаметром до 5 м, толщиной стенки до 40 мм и длиной до нескольких метров) и различной формы. Ротационную вытяжку можно успешно использовать для обработки как обычных сталей и сплавов, так и труднодеформируемых и тугоплавких материалов (см. рисунок 1.8).

Рисунок 1.8 – Деталь из алюминиевого сплава, полученная ротационной вытяжкой

Возможность изменения в широких пределах геометрических параметров рабочего профиля деформирующего элемента (ролика) в сочетании с оптимальными режимами обработки позволяет регулировать качество изделий и получать высокую размерную точность и низкую шероховатость поверхности.

Практическое применение ротационной вытяжки дает возможность значительно снизить объем первоначальных затрат на приобретение оборудования, изготовление инструмента и оснастки по сравнению с

другими видами обработки, в частности глубокой вытяжки на прессах, и позволяет эффективно использовать указанный метод в мелко- и среднесерийном производствах крупногабаритных деталей сложной формы.

Применение той или иной схемы ротационной вытяжки наряду с выбором рабочего инструмента (геометрии ролика) в значительной мере определяет качество получаемых деталей. Схемы ротационной вытяжки отличаются способами базирования деталей и траекторией перемещения инструмента [78]. При ротационной вытяжке деталей с криволинейной образующей (см. рисунок 1.9) и конических деталей (см. рисунок 1.10), имеющих отношение длины детали к диаметру $L/D \le 2$, для легких и средних работ используются преимущественно одноролико вые станки.

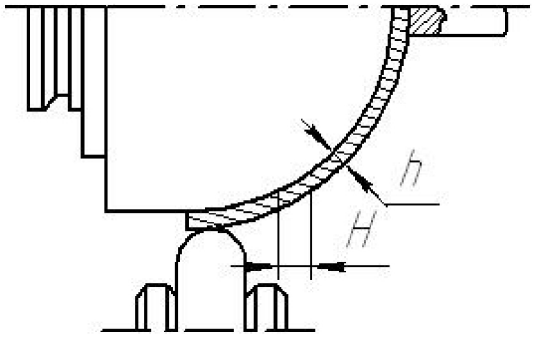

Рисунок 1.9 – Схема ротационной вытяжки деталей с криволинейной образующей

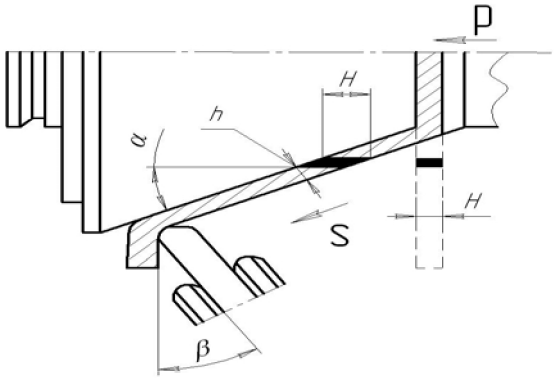

Рисунок 1.10 – Схема ротационной вытяжки деталей с конической образующей: S – направление подачи

При ротационной вытяжке конических деталей с утонением стенки по закону синуса из плоской заготовки толщина стенки равна:

$$h = H \cdot \sin\alpha ,$$

где H – толщина заготовки;

α – угол наклона образующей конуса к его оси.

Особенность формоизменения по закону синуса состоит в том, что диаметр исходной заготовки остается постоянным в любой стадии формоизменения. Поэтому для правильного ведения процесса ротационной вытяжки необходимо, чтобы перемещение ролика производилось строго параллельно

образующей конуса оправки на заданном от нее расстоянии, определяемом зазором $z = h$, т.е.

$$z = H \cdot \sin\alpha .$$

Отсюда определяем исходную толщину заготовки:

$$H = h / \sin\alpha .$$

Схема, изображенная на рисунке 1.10, может быть рекомендована для получения за один проход конических деталей с минимальным углом конусности $2\alpha \geq 30^{\circ}$. При изготовлении конических деталей с меньшими углами в качестве исходной заготовки используют предварительно полученный конус (например, по вышеописанному способу). По схеме, изображенной на рисунке 1.9, могут быть также получены детали с криволинейной образующей из кружка толщиной H. В этом случае толщина стенки детали в данной точке будет зависеть от угла наклона касательной в этой точке к оси детали. В каждой конкретной точке:

$$h_i = H \cdot \sin\alpha_i ,$$

где α_i – угол наклона образующей в данной точке.

Недостатком способа ротационной вытяжки является то, что он не обеспечивает гарантированного получения высококачественной уплотненной внутренней поверхности изделия непосредственно в процессе формообразования. Это связано с тем, что плотность, шероховатость получаемой внутренней поверхности зависят от нормального удельного давления, возникающего под роликом, которое, в свою очередь, определяется нормальной компонентой напряжения и деформации. При ротационной вытяжке по закону синуса формообразование осуществляется в основном за счет сдвиговой компоненты деформации, поэтому нормальное удельное давление, необходимое для получения высококачественной плотной и гладкой поверхности, не обеспечивается в силу самой кинематики процесса [65]. Ротационную вытяжку деталей можно осуществлять прямым и обратным способами, отличающимися направлением течения материала по отношению к направлению осевой подачи деформирующего ролика. При обратном

способе вытяжки можно получать детали с длиной в несколько раз большей, чем длина оправки. Однако точность получаемых деталей в этом случае оказывается низкой, в связи с чем на практике большее применение имеет прямой способ ротационной вытяжки, но в любом случае получить деталь с равномерной толщиной и криволинейной образующей невозможно, что исключает изготовление тонкостенных осесимметричных деталей выпуклой формы [4]. При разработке технологических процессов ротационной вытяжки в настоящее время используют эмпирические зависимости из различных справочных материалов, а также результаты теоретических исследований, в которых не в полной мере учитываются локальный характер формоизменения и механические свойства материала заготовки. Мало изучен процесс ротационной вытяжки с разделением деформаций, который обещает перспективы в отношении использования внутренних резервов деформирования, уменьшения силовых режимов и повышения качества изготавливаемых деталей. Ротационная вытяжка имеет ряд важных преимуществ перед другими методами обработки, в том числе позволяет из простейших форм заготовок получать детали сложной конфигурации, изготовление которых другими методами затруднительно или невозможно. К недостаткам способа, кроме качества изделий, относится и низкая производительность труда, которая требует интенсификации производства – совершенствования технологии и оборудования [16,46]. В сравнении с инструментальной штамповкой вышеуказанный недостаток является основным, поэтому ротационную вытяжку применяют для мелкосерийного производства. Использование станков с ЧПУ требует очень высокой жесткости схемы, также малейшие отклонения от установки (упругие деформации смещения) приводят к браку. Кроме того, отладка процесса с ЧПУ весьма трудоемка. К существенному недостатку ротационной вытяжки относится и значительный наклеп заготовки. Это объясняется наличием при ротационной вытяжке элементов изгиба и спрямления, вызванных вдавливанием ролика в металл. Хотя эти величины невелики, но при малой

подаче ролик проходит эти места по несколько раз и поэтому наклепанная деформация велика. Рассмотренные явления сужают рамки использования малопластичных сплавов и сплавов с удовлетворительной штампуемостью, так как возникает необходимость в большом числе штамповочных операций и промежуточных отжигов [76]. В целом, предлагаемый способ – ротационная вытяжка – является трудоемким, требующим высокой жесткости инструмента и мощной оснастки.

1.2.2 Способы инструментальной штамповки получения тонкостенных деталей

Рассмотрим способы получения тонкостенных осесимметричных деталей с использованием инструментальной штамповки.

- Проанализируем возможности процесса отбортовки к получению конических тонкостенных деталей из кольцевой заготовки (см. рисунок 1.11).

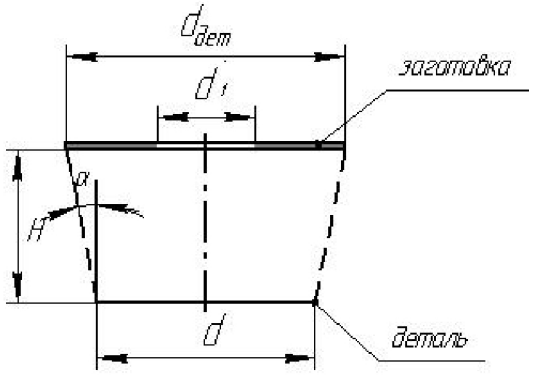

Рисунок 1.11 – Схема процесса отбортовки из кольцевой заготовки:
$d_{дет}$ – больший диаметр детали; d – меньший диаметр детали; d_1 – диаметр отверстия в заготовке; α – угол конусности детали; H – высота детали

Принимаем следующие допущения:

- о равномерном утонении заготовки;
- ограничением процесса считаем предельный коэффициент отбортовки.

Основой расчета является постоянство объема поверхности металла заготовки и детали:

$$F_{дет}S_{дет} = F_{заг}S_{заг}, \qquad (1.3)$$

где $F_{заг}$, $F_{дет}$ – площадь заготовки, площадь детали;

$S_{заг}$, $S_{дет}$ – толщина заготовки, толщина детали.

Считаем, что толщина детали меняется по линейному закону:

$$S_{дет} = \frac{S_{заг} + S_{кр}}{2},$$

где $S_{кр}$ – толщина кромки, равная: $S_{кр} = S_{заг}\sqrt{\frac{d_1}{d_{дет}}}$ [70].

Рассмотрим возможность получения деталей с высотой $H = \frac{1}{2}d_{дет}$. Исходя из геометрических соображений, имеем:

$$\frac{d^2}{(1-\mathrm{tg}\alpha)^2} - d_1^2 = \frac{d}{2\cos\alpha(1-\mathrm{tg}\alpha)}\left(d + \frac{d}{1-\mathrm{tg}\alpha}\right)\left(\sqrt{\frac{d_1}{d}+1}\right). \qquad (1.4)$$

Вводим обозначение $k_{отб} = \frac{d}{d_1}$, и формула (1.4) принимает вид:

$$\frac{k_{отб}^2}{(1-\mathrm{tg}\alpha)^2} - 1 = \frac{k_{отб}^2}{2\cos\alpha(1-\mathrm{tg}\alpha)}\left(1 + \frac{1}{1-\mathrm{tg}\alpha}\right)\left(\sqrt{\frac{1}{k_{отб}}+1}\right). \qquad (1.5)$$

Зададимся углом конусности $\alpha = 20^\circ$ и обозначим левую часть уравнения (1.5) через y, а правую через z. Построим графики функций y и z в зависимости от переменной $k_{отб}$, которая является коэффициентом отбортовки.

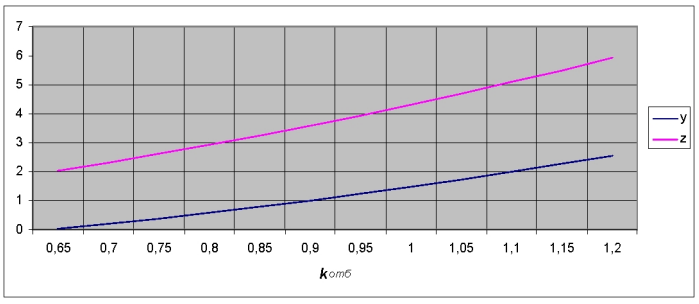

Рисунок 1.12 – Графики функций $y(k_{отб})$ и $z(k_{отб})$ при $\alpha = 20^\circ$

По характеру графика мы видим – точки пересечения линий нет, что позволяет нам сделать вывод о невозможности применения способа

отбортовки для деталей предложенной геометрии с высотой $H = \frac{1}{2} d_{дет}$, а также и более высоких с $H = \frac{3}{4} d_{дет}$, $H = d_{дет}$. Получение таких деталей требует большого числа переходов.

- К инструментальному способу относится способ изготовления, заключающийся в отбортовке сварной конической заготовки путем удерживания ее за фланец со стороны большого открытого торца (см. рисунок 1.13).

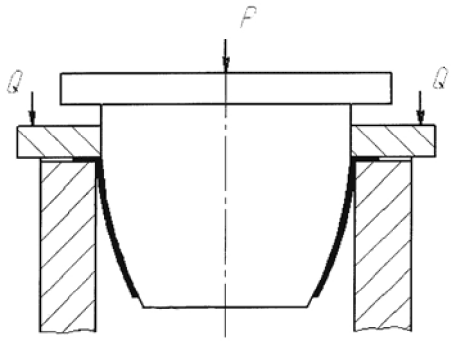

Рисунок 1.13 – Схема отбортовки в инструментальном штампе тонкостенных заготовок

Операция отбортовки по мере выявления и расширения технологических возможностей начинает все шире применяться в различных отраслях промышленности. Этим способом могут быть изготовлены различного вида патрубки, переходники, фланцы, а также корпусные детали ответственного назначения. Технологические возможности операции определяются предельным значением коэффициента отбортовки k_0, равным отношению диаметра заготовки до отбортовки к диаметру заготовки после отбортовки. Схема на рисунке 1.13 применима для тех деталей, которые легко отбортовываются [40], но возникающее пружинение кромки большого торца требует значительных дополнительных трудозатрат, например термофиксации [13]. Очень часто необходимое качество детали достигается механической обработкой. Детали, подвергаемые в дальнейшем механической обработке, имеют весьма значительный припуск по толщине, что особенно важно для разнотолщинных деталей. В связи с этим, для

получения изделия заданной толщины возникает необходимость использования заготовки из листа завышенной толщины, что сопровождается перерасходом металла. Например, оставив под припуск детали (1-1,5) мм, возможно исходную толщину заготовки уменьшить до (5-5,5) мм, сократив тем самым выход годного материала на 40-50%. Качественно оценить приведенное повышение точности получаемой детали по данной схеме можно тем, что при такой схеме вдоль образующей действуют большие растягивающие напряжения. Максимальное значение они приобретают на торце большого основания. Наличие больших растягивающих напряжений снижает их неравномерность по толщине. Последнее обстоятельство повышает точность, но разнотолщинность деталей, получаемых способом отбортовки, достаточно велика (см. рисунок 1.14).

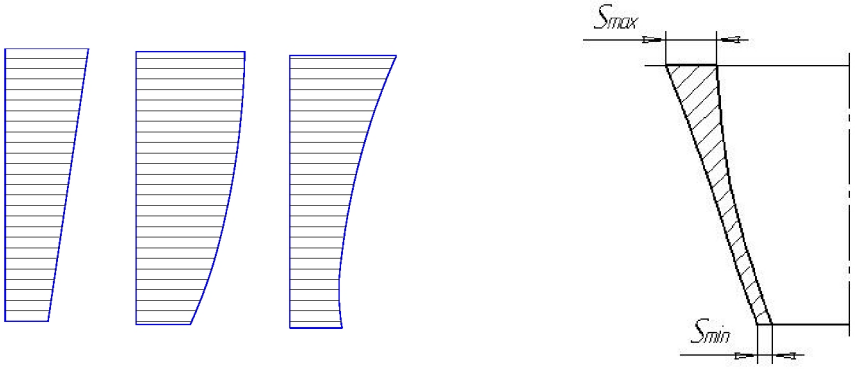

Рисунок 1.14 – Характер изменения толщин вдоль образующей тонкостенных осесимметричных деталей, получаемых способом отбортовки при разных значениях коэффициента трения

- Основной формообразующей операцией из листовой заготовки является операция вытяжки [38,54]. В настоящее время на промышленных предприятиях при изготовлении средних и высоких конических оболочек распространение получила вытяжка в инструментальных штампах. Это объясняется относительной простотой применяемой оснастки и оборудования, достаточно полным освоением процесса, но исследования в области глубокой вытяжки показывают, что напряженно-деформированное состояние, свойственное операции вытяжки, приводит к неравномерной толщине стенки детали [30,31,60,62]. Толщина материала в месте перехода от

дна к стенкам уменьшается, являясь опасным сечением. Характер изменения на первой операции вытяжки толщины цилиндрической [86] и конической [77] деталей показан на рисунке 1.15.

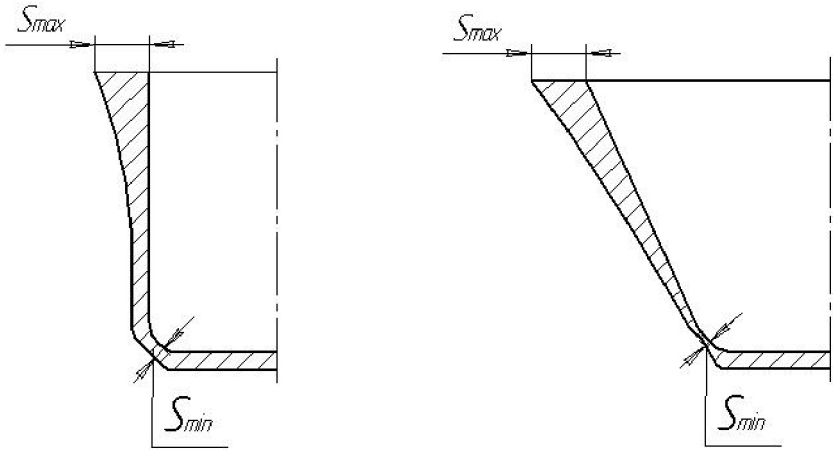

Рисунок 1.15 – Типовая эпюра изменения толщины стенок цилиндрической и конической деталей после первой операции вытяжки

При вытяжке деталей имеют место зоны интенсивного утонения и утолщения заготовки. Величину максимального утолщения определяют для изотропного металла во фланце заготовки на его кромке, где напряженное состояние близко к линейному, из геометрических соотношений:

$$S_{\max} = S_{заг}\sqrt{\frac{R_{заг}}{R_1}},$$

где $S_{\max}$ – максимальная толщина детали;

$S_{заг}$ – толщина заготовки;

$R_{заг}$ – радиус заготовки;

R_1 – радиус детали.

Если степень деформации не превысит величину допустимого утонения, то минимальную толщину стенки приближенно можно определить следующим образом [70,73]:

$$S_{\min} = S_{заг}\exp\left[-\left(\frac{\sigma_\rho}{A}\right)^{\frac{1}{n}}\left(1-\mu^2\right)^{\frac{1+n}{2n}}\right],$$

где A, n – константы упрочнений штампуемого материала;

σ_ρ – напряжения в меридиональном направлении.

Если определить разнотолщинность детали, полученную при вытяжке, то она достигает 80%.

Полный анализ операции вытяжки показал, что на величину и характер толщины стенки оказывают в той или иной степени влияние различные факторы: граничные условия, способ вытяжки, трение, геометрические параметры штамповой оснастки, механические свойства штампуемого материала, анизотропия материала. При этом имеет место переменное изменение толщины стенки не только вдоль образующей, но и по периметру. Исследования, проведенные В.В. Шевелевым [85] для различных материалов (алюминиевые, сталь), приводят к выводу, что при умеренной плоскостной анизотропии влияние ее на изменение толщины стенки вдоль образующей может быть учтено с помощью осредненного показателя нормальной анизотропии. Так, например, толщину кромки вытянутой заготовки можно рассчитать, используя зависимость [72]:

$$S_{\min} = S_{заг} \exp\left(\mu \cdot \ln \frac{R_н}{r_{дет}}\right),$$

где μ – коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;

$r_{дет}$ – радиус детали по срединной поверхности;

$R_н$ – радиус кромки детали в момент достижения максимального усилия.

Вытяжкой можно получать различные детали конической формы: низкие, в виде усеченного конуса, и высокие, остроконечные с малым и большим углом конусности. Вытяжка высоких конических деталей с небольшим углом наклона образующей (30-60°) может осуществляться одним из двух способов.

Первый вариант многопереходной вытяжки конических деталей характеризуется тем, что за предварительные переходы получают ступенчатую деталь, у которой касательная к наружному контуру имеет тот же угол наклона к оси симметрии, что и образующая конической детали,

заданной к изготовлению (ступенчатый полуфабрикат вписывается в контур готового изделия). На последнем переходе вытяжки как бы спрямляется образующая, т.е. ступенчатая заготовка превращается в коническую деталь. Заметим, что при таком спрямлении образующей диаметральные размеры выступающих частей контура уменьшаются, а диаметральные размеры внутренних угловых участков ступеней увеличиваются. Уменьшение диаметральных размеров при малой относительной толщине заготовки может привести к потере устойчивости с образованием продольных складок. Для уменьшения значения тангенциального сжатия выступающих участков контур заготовки рекомендуется вписывать в контур детали (см. рисунок 1.16), т.е. предусматривать у первой ступени диаметр, который был бы меньше максимального диаметра конической детали.

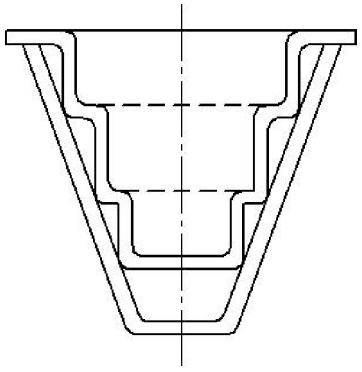

Рисунок 1.16 – Схема вытяжки конических деталей

При использовании такой заготовки фланец размещается на плоскости матрицы, и величины вертикальных смещений ступеней при спрямлении образующей будут минимальными, а соответственно будет меньшим и тангенциальное сжатие выступающих участков контура заготовки по сравнению с заготовкой, расположенной в матрице таким образом, что фланец не доходит до его плоскости. При таком варианте вытяжки значительные трудности вызывает устранение следов перехода от одного участка к другому. Действительно, при переходе от одной ступени к другой имеются торообразные участки, оформившиеся по скругленным кромкам пуансона и матрицы. Спрямление участков на последнем переходе вытяжки

детали может быть достаточно полно осуществлено, если в заключительной фазе деформирования (при подчеканке) в заготовке будут действовать большие меридиональные растягивающие напряжения. Однако увеличение меридиональных растягивающих напряжений может привести к разрушению заготовки в опасном сечении. Для достаточно полного выпрямления торообразных участков, когда требуется высокая чистота поверхности и прямолинейность образующей, приходится прибегать к заключительным отделочным операциям, например к проглаживанию поверхности на токарно-давильных станках. Способ не обеспечивает получение гладкой поверхности детали, так как следы переходов после калибровки остаются (см. рисунок 1.17).

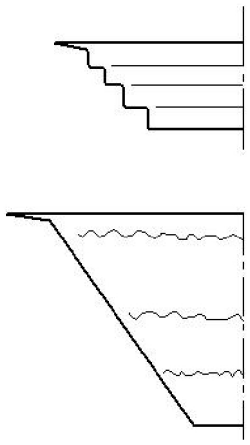

Рисунок 1.17 – Схема многооперационной вытяжки ступенчатого полуфабриката, вписанного в контур готового изделия

Данный способ вытесняется другим, при котором вначале вытягивается полуфабрикат, поверхностью равный или несколько больший поверхности конической детали, причем размеры борта равны размерам бортов конуса. Затем за каждую последующую операцию вытягивается все увеличивающаяся часть конической поверхности. По второму способу за первую операцию вытягиваются цилиндрическая заготовка диаметром, равным диаметру основания конуса, после чего за каждую последующую операцию вытягивается все увеличивающаяся коническая поверхность (см. рисунок 1.18). Построение переходов в данном случае сходно с построением переходов при вытяжке деталей с широким фланцем, где каждый

последующий переход увеличивает ширину фланца без изменения его наружного диаметра. При вытяжке конических деталей по данному варианту наружные размеры заготовки также не изменяются, но на последующих переходах вытяжки увеличиваются размеры конической поверхности, причем угол наклона образующей к оси симметрии равен углу, заданному в готовой детали. Этот вариант вытяжки позволяет получить лучшее качество поверхности, чем предыдущий, так как спрямление торообразного участка при его переходе в конический может быть осуществлено при наличии достаточно больших меридиональных растягивающих напряжений, и вместе с тем угол поворота при спрямлении меньше, чем в предыдущем варианте.

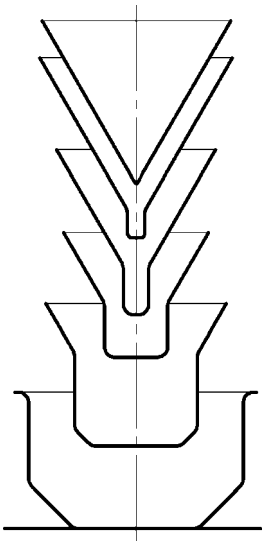

Рисунок 1.18 – Способ постепенного увеличения высоты конуса

Качество поверхности готовой детали при вытяжке вторым способом выше и в целях устранения возможности образования складок принимают более высокие значения допустимых коэффициентов вытяжки. При малых углах конусности α и значениях h/d_2, при которых коэффициент вытяжки $k_{выт} = d_1/d_2$ не превышает значений, допускаемых для последующей вытяжки цилиндрических стаканов. Изготовление конических деталей осуществляется путем получения за необходимое количество переходов

цилиндрического стакана с диаметром, равным наибольшему диаметру конической детали, и затем превращением за один переход вытяжки цилиндрической заготовки в коническую деталь (см. рисунок 1.19).

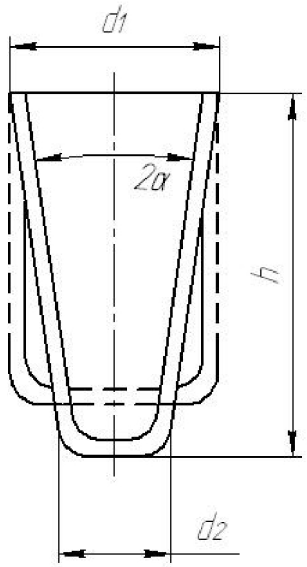

Рисунок 1.19 – Схема вытяжки цилиндрической заготовки в коническую деталь:
d_1 – больший диаметр детали; d_2 – меньший диаметр детали; h – высота детали;
α – угол конусности детали

Недостаток этих весьма распространенных способов заключается в том, что на поверхности штампованных деталей обычно остаются следы излома в местах сопряжения ступеней заготовки. Эти неровности не удается полностью устранить на заключительной калибровочной операции.

При производстве деталей летательных аппаратов чаще применяют другой способ вытяжки, который лишен указанного недостатка. В процессе многопереходной вытяжки наклонная стенка или стенка с более сложной формой образующей формируется постепенно, как бы наращивается в каждой последующей операции. На рисунке 1.20 показана последовательность формоизменяющих операций при штамповке охлаждаемого кожуха камеры сгорания ЖРД, на рисунке 1.21 – эпюра изменения толщины по образующей детали и объем, идущий в отход при окончательной механической обработке.

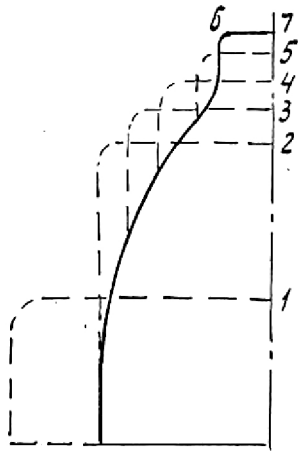

Рисунок 1.20 – Последовательность штамповочных переходов при изготовлении кожуха камеры сгорания: 1-6 – вытяжка, 7 – калибровка

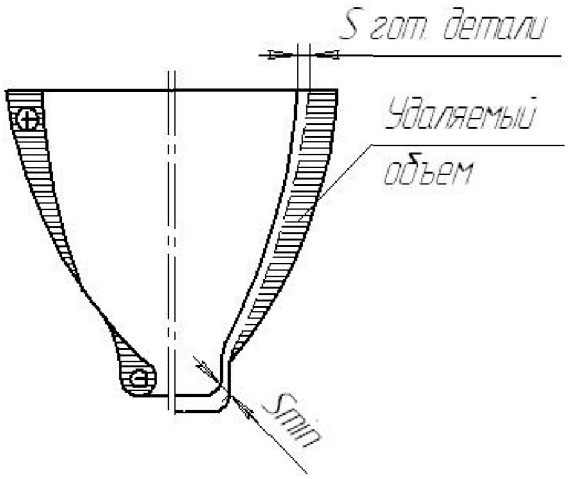

Рисунок 1.21 – Эпюра изменения толщины по образующей детали и объем, идущий в отход при окончательной механической обработке

Низкая величина предельной степени деформации за одну операцию при вытяжке высоких деталей приводит к значительному числу 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. Совершенствование технологического процесса в направлении увеличения формоизменения за один переход и интенсификация формообразования оболочек с конической и криволинейной поверхностями является важной и актуальной проблемой [47,48,49,66,67].

Проанализируем возможности процесса вытяжки к получению тонкостенных деталей типа конусов (см. рисунок 1.22).

Принимаем следующие допущения:

- о равномерном распределении толщин;
- ограничением процесса считаем предельный коэффициент вытяжки.

Основой расчета является постоянство площади поверхности металла заготовки и детали:

$$F_{дет} = F_{заг} = F_{дна} + F_{конус}.$$

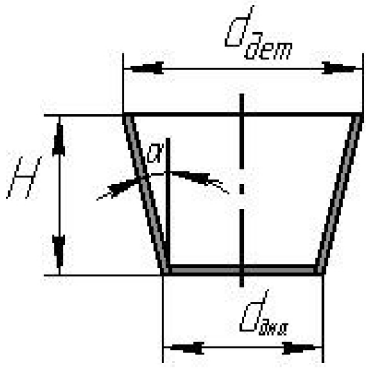

Рисунок 1.22 – Схема процесса вытяжки:
$d_{дет}$ – больший диаметр детали; $d_{дна}$ – диаметр дна детали;
α – угол конусности детали; H – высота детали

Рассмотрим возможность получения деталей с высотой $H = \frac{1}{2} d_{дет}$.

Исходя из геометрических соображений, имеем:

$$d_{заг} = d_{дна} \sqrt{1 + \frac{2}{(2 - 2\mathrm{tg}\alpha)\cos\alpha} \left(2 + \frac{2\mathrm{tg}\alpha}{2 - 2\mathrm{tg}\alpha} \right)}.$$

Зададимся углом конусности α и найдем соотношения $\frac{d_{заг}}{d_{дна}}$.

При $\alpha = 0$: $\frac{d_{заг}}{d_{дна}} = \sqrt{1 + 1 \cdot 2} = \sqrt{3}$.

При $\alpha_{\max}$ и $d_{дна} = 0$ (экстремальный случай) с учетом $H = \frac{1}{2} d_{дет}$ имеем:

$$\alpha_{\max} = \mathrm{arctg} \left(\frac{d_{дет} - d_{дна}}{2H} \right) = \mathrm{arctg}1 = 0,785 \quad \text{рад} = 45^{\circ}.$$

Рассчитали количество операций вытяжки по известной методике [76] (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.1 – Количество операций вытяжки при $H = \frac{1}{2} d_{дет}$

$\frac{S}{d_{дна}}$ \ $\frac{d_{заг}}{d_{дна}}$	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3
0,02-0,01	1	1	1	1	2
0,01-0,05	1	1	2	2	2
0,005-0,002	1	2	2	2	3

По аналогии провели вычисления для варианта $H = \frac{3}{4} d_{дет}$ и получили результаты, приведенные в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Количество операций вытяжки при $H = \frac{3}{4} d_{дет}$

$\frac{S}{d_{дна}}$ \ $\frac{d_{заг}}{d_{дна}}$	2,0	2,1	2,3	2,5	2,8	3,3
0,02-0,01	1	2	2	2	2	3
0,01-0,05	2	2	2	3	3	4
0,005-0,002	2	2	3	3	3	4

По аналогии провели вычисления для варианта $H = d_{дет}$ и получили результаты, приведенные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Количество операций вытяжки при $H = d_{дет}$

$\frac{S}{d_{дна}}$ \ $\frac{d_{заг}}{d_{дна}}$	2,2	2,4	2,6	2,9	3,2	3,8
0,02-0,01	2	2	2	2	3	3
0,01-0,05	2	2	3	3	4	5
0,005-0,002	2	3	3	3	4	5

На основании расчета сделаны следующие выводы:

- при уменьшении $d_{дна}$ количество переходов возрастает. Например, для деталей с характерной геометрией при $H = d_{дет}$ и $\frac{S_{заг}}{D}$=0,02-0,01 N меняется от 2 до 3; при $\frac{S_{заг}}{D}$=0,01-0,05 N меняется от 2 до 5; при $\frac{S_{заг}}{D}$=0,005-0,002 N меняется от 2 до 5;
- количество переходов резко возрастает при изменении высоты детали, но одинаковых углах α: при $H = \frac{1}{2} d_{дет}$ для $\alpha = 20^{\circ}$, $\frac{S_{заг}}{D}$=0,01-0,05 N=2, уже при увеличении глубины вытяжки $H = d_{дет}$ для того же значения угла и том же отношении $\frac{S_{заг}}{D}$=0,01-0,05 количество переходов возрастает до N=5.

Помимо резкого возрастания N приходится дополнительно применять межоперационный отжиг и операции обезжиривания, сушки, покрытия лаком, промывки (для нержавеющих сталей и титановых сплавов), что усложняет процесс и делает нецелесообразным применение вытяжки для изготовления деталей с $H = d_{дет}$, но подходящим для деталей средней высоты.

- Технология изготовления тонкостенных осесимметричных деталей включает часто деформирование разжимными секционными пуансонами [11,16,55,75,87]. При обтяжке с помощью разжимных пуансонов используют штамп, схема которого приведена на рисунке 1.23. Особенность способа в том, что детали после штамповки по окружности в тангенциальном (широтном) направлении имеют недопустимую огранку, из-за которой геометрические формы детали не соответствуют поставленным требованиям, ухудшаются эксплутационные характеристики изделия. Для устранения огранки деталь в дальнейшем приходится калибровать, используя весьма трудоемкую операцию термофиксации. Механизм огранки состоит в следующем (см. рисунок 1.23).

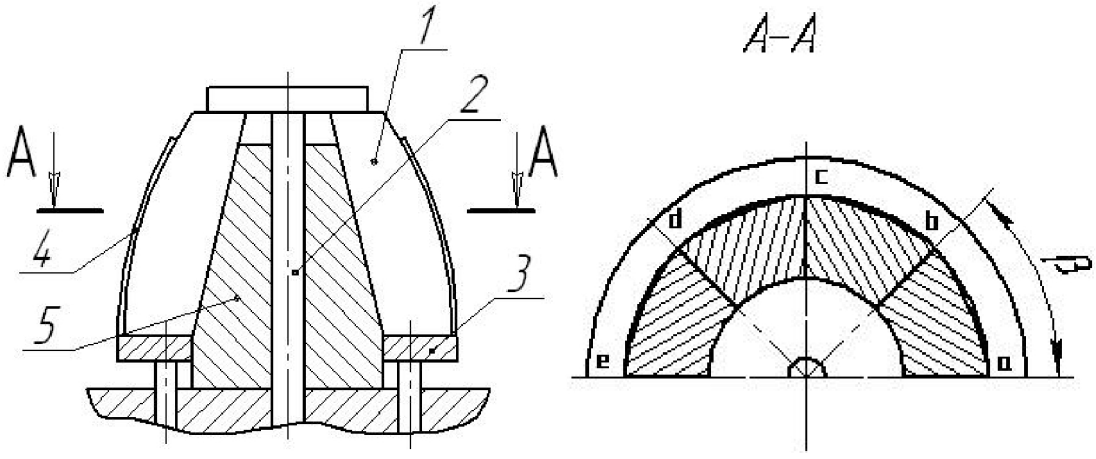

Рисунок 1.23 – Штамп для обтяжки с помощью разжимного пуансона: 1 – сегменты растяжных пуансонов; 2 – шток; 3 – выталкиватель; 4 – заготовка; 5 – конус

В исходном положении, когда сегменты сжаты, заготовка касается тех участков на рабочей поверхности сегментов, которые соприкасаются друг с другом (точки *a, b, c, d, e*; сечение *A-A*). При этом в виду того, что радиусы

рабочей поверхности сегментов в тангенциальном (широтном) направлении больше соответствующих радиусов заготовки, остальные части заготовки свободны от прилегания к деформирующему инструменту (сегментам), образуя прогиб f (см. рисунок 1.24). При движении сегментов вниз по конусу 5 (см. рисунок 1.23) между сегментами образуется зазор, и деформацию в первую очередь получают элементы заготовки в зоне, прилегающей к точкам *a, b, c, d, e*, за счет уменьшения радиуса кривизны (изгиба). Эти элементы заготовки к моменту окончания процесса получают наибольшую деформацию, а следовательно наклеп. Поэтому при упругой разгрузке в результате неравномерных остаточных деформаций в широтном направлении образуется огранка. Т.е. в этих местах происходит увеличение радиуса от того значения, которое определяет окружность в широтном направлении. Это имеет место по всей длине образующей в меридиональном направлении – между меньшим и большим основанием детали. Уменьшить огранку можно за счет многократного поворота заготовки, однако и в этом случае заготовку приходится подвергать термофиксации, даже при использовании конструкции сегментов с гребешками (см. рисунок 1.24).

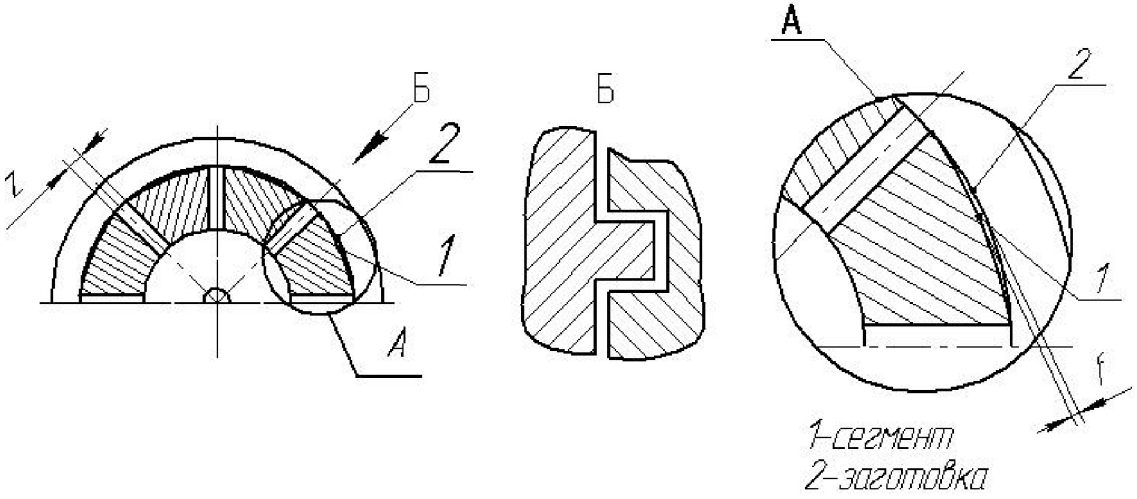

Рисунок 1.24 – Конструкция сегментов с гребешками

Кроме того, к недостаткам способа следует отнести неравномерность распределения толщины детали в обоих направлениях. Неравномерность по

толщине в отдельных случаях достигает 15-20% [14,28,57]. Наибольшие деформации заготовка получает на наиболее выпуклых участках. Эта разница по образующей представляет довольно значительную величину. Поэтому в отдельных случаях формообразование сложных деталей за один переход не может быть проведено.

По данным А.М. Абрамова [28] формообразование деталей за один переход можно производить из листовых материалов 1Х18Н9Т, стали 20 и АМц-М с коэффициентом обтяжки $K_{ОБТ}$ = 1,18-1,2; из материалов ЭИ435 и АМг-АМ – с $K_{ОБТ}$ = 1,1-1,12; из стали 30ХГСА – с $K_{ОБТ}$ = 1,06-1,08. Для получения же детали с $K_{ОБТ}$ = 1,2 из материалов ЭИ435 и АМг-АМ потребуется две, а для стали 30ХГСА – три операции с промежуточными отжигами. Как и всякий другой технологический процесс, процесс обтяжки имеет свои ограничения, определяемые степенью деформации того или иного материала, которую он может претерпевать без разрушения. Если степень деформации, которая необходима для полной обтяжки детали данной геометрической формы, больше, чем это допускается пластичностью материала, произвести обтяжку за один переход не удается. Однако из этого не следует, что получить деталь такой геометрической формы обтяжкой невозможно, так как путем термической обработки можно восстановить пластичность металла и вести процесс дальше, т.е. осуществить второй переход процесса обтяжки, затем, если нужно, третий и т.д. Необходимо найти показатель, с помощью которого можно было бы определить, возможна ли обтяжка той или иной детали за один переход или же для ее изготовления требуется несколько переходов. В качестве такого показателя предложено применять так называемый коэффициент обтяжки, который представляет собой увеличенное на единицу значение удлинения в направлении приложения растягивающего усилия:

$$K_{ОБТ} = 1 + e_y,$$

где e_y – удлинение в направлении приложения растягивающего усилия.

Для каждого конкретного материала возможность получения детали за один переход может быть определена путем сравнения геометрического коэффициента обтяжки и предельно допустимого. Предельным для определенных конкретных условий коэффициентом обтяжки будет называться увеличенное на единицу наибольшее допустимое значение удлинения, при котором материал заготовки еще не подвергается опасности разрушения.

Характер изменения толщин тонкостенных осесимметричных деталей, получаемых способом обтяжки с помощью разжимных пуансонов, показан на рисунке 1.25.

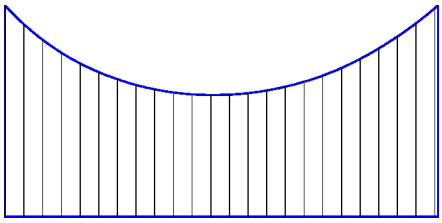

Рисунок 1.25 – Характер изменения толщин тонкостенных осесимметричных деталей, получаемых способом обтяжки с помощью разжимных пуансонов

Способ хорош тем, что для штампов такой конструкции не требуется большой открытой высоты, однако пружинение и разнотолщинность деталей велики.

Процесс кольцевой обтяжки протекает аналогично процессу простой обтяжки. Различие состоит в том, что при кольцевой обтяжке вследствие наличия большего количества секторов силы трения в направлении, касательном к окружности разжимного пуансона, играют существенно меньшую роль; деформации в этом направлении более приближаются к равномерно распределенным и, следовательно, напряженно-деформированное состояние – к осесимметричному.

Несмотря на существенный недостаток данного способа – наличие огранки поверхности детали, обтяжка с помощью разжимных секционных пуансонов остается привлекательной в своем применении, что подтверждается постоянным совершенствованием способа, его

модернизацией. Так, например, для повышения технологических возможностей в работе [64] предложен разжимной пуансон, который содержит секторы в виде упругих конических колец со сквозной конической прорезью. В качестве материала для изготовления упругих конических колец применили сталь с высоким пределом прочности. Применение конструкции, описываемой в [64], направлено на повышение качества изготавливаемых деталей за счет устранения штамповочных следов, возникающих на стыке секторов и клиньев. В работе [7] деформирование разжимным инструментом идет в две стадии. На первой стадии распространяется очаг пластической деформации от центральной части к ее торцам до достижения окружной деформации в центральной части заготовки 95-98% и на торцах 0,2-1% от требуемой, а на второй стадии очаг пластической деформации распространяется от торцов заготовки к ее центральной части до достижения требуемой формы.

- Совершенствование технологического процесса иногда достигается за счет совмещения нескольких операций в одном переходе. Совмещением операций листовой штамповки в одном штампе достигаются различные цели [1,2,3,5,9,13] и при этом может образоваться один общий или два самостоятельных очага деформации. Если обе совмещаемые операции приводят к уменьшению поперечных размеров деформируемой заготовки (например, вытяжка и обжим), то очаг деформации один, он охватывает участок заготовки, имеющий переменную площадь поперечного сечения. Если одна из совмещенных операций приводит к увеличению, а другая к уменьшению поперечных размеров заготовки (например, раздача и обжим), то образуются два отдельных очага деформации, разделенных между собой упруго-деформированным участком. В этом случае общая степень деформации заготовки будет равна сумме степеней деформаций, получаемых в результате выполнения одной и второй совмещаемых операций. Совмещение формоизменяющих операций (вытяжки, обжима, раздачи и т.д.) позволяет уменьшить напряжение в опасном сечении заготовки, повысить

критическую степень деформаций, сократить число переходов, необходимых для получения детали, в связи с изменением характера положения внешних сил. Основным недостатком этих совмещенных способов являются большие колебания толщины получаемых деталей (см. рисунок 1.26). Также необходимо помнить, что операции, включающие сжимающие напряжения в схеме напряженно-деформированного состояния, (например, обжим) не подходят для тонкостенных осесимметричных деталей, поскольку оказывают сильное влияние на устойчивость заготовки. При определенной критической величине сжимающих напряжений происходит локальная потеря устойчивости заготовки (выпучивание), завершающаяся в большинстве случаев складкообразованием. Экспериментально установлено [13], что при относительной толщине заготовки менее 0,02-0,03 возникают продольные складки в зоне пластической деформации, направленные вдоль образующей.

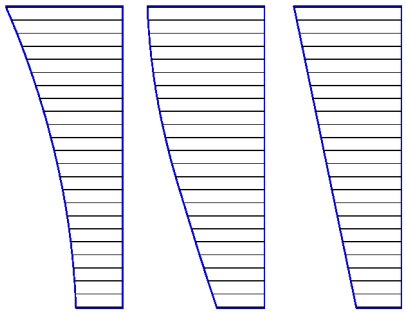

Рисунок 1.26 – Характер изменения толщин вдоль образующей тонкостенных осесимметричных деталей, получаемых вытяжкой с последующим обжимом-отбортовкой [74] при разных значениях коэффициента обжима

- Одним из наиболее перспективных способов (см. рисунок 1.27) получения тонкостенных осесимметричных изделий из сварной листовой заготовки является способ, основанный на процессах отбортовки-формовки [8]. С его помощью появляется возможность получения равномерной толщины изделия и уменьшения толщины исходной заготовки на 45-50% за счет уменьшения припуска на механическую обработку по толщине для высоких деталей сужающейся формы.

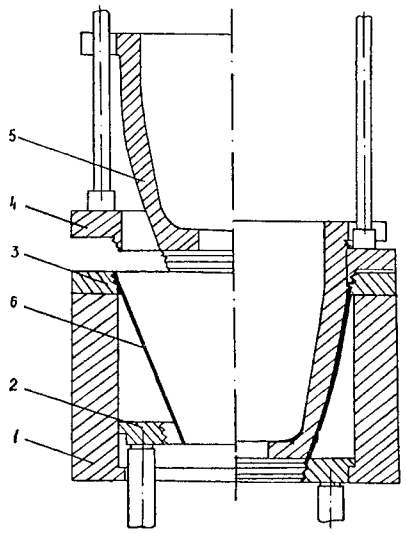

Рисунок 1.27 – Схема штампа для реализации способа отбортовки-формовки:
1 – подкладная плита; 2 – выталкиватель; 3 – матрица; 4 – прижим;
5 – пуансон; 6 – заготовка

Оснастка, изображенная на рисунке 1.27, состоит из подкладной плиты 1, выталкивателя 2, матрицы 3, прижима 4, пуансона 5. Рассмотрим этапы способа на примере конической заготовки, из которой получают деталь выпуклой формы. Заготовка 6 типа конуса устанавливается в штамп так, чтобы ее наружная поверхность, прилегающая к открытому большому торцу, легла на рабочую поверхность матрицы 3. При опускании прижима 4 заготовка зажимается между поверхностями прижима 4 и матрицы 3. При опускании пуансона 5 осуществляется отбортовка свободной части заготовки до тех пор, пока не произойдет зажим заготовки со стороны малого торца. После этого одновременно с отбортовкой происходит растяжение заготовки вдоль образующей. Причем усилие растяжения приложено только со стороны большого торца, так как малый торец заготовки в начальной стадии деформирования свободен от зажима. Зажим по малому торцу заготовки происходит в момент, когда ход формующего инструмента станет равным высоте исходной заготовки, считая от плоскости ее большого торца. С этого момента усилие растяжения вдоль образующей прикладывается по всей заготовке, идет процесс формовки, который заканчивается при увеличении высоты заготовки на 5-10%. Такая степень деформации достаточна, чтобы

после снятия усилия в заготовке наблюдалась высокая равномерность остаточных напряжений. Эти условия обеспечивают высокое качество изделия из-за совпадения размеров изделия с размерами штамповой оснастки, в данном случае внутренней поверхности заготовки с рабочей поверхностью пуансона. Точность отштампованного изделия соответствует 5-6 квалитету. Поверхность инструмента в местах зажима заготовки имеет шероховатость в виде мелкой насечки.

Получить равномерную толщину возможно при наличии активных сил трения и выполнив условие [74]:

$$\iint_F (S_T - S_{зад})^2 dF \to \min, \qquad (1.6)$$

где $S_{зад}$ – заданная толщина детали;

S_T – технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки;

F – площадь детали по срединной поверхности.

Предложенная схема формовки дает возможность получить детали размерами близкими к геометрическим размерам штамповой оснастки, так как величина пружинения меньше, чем при отбортовке [43]. Оценить это можно, сравнив пружинение кромки при отбортовке и формовке при формообразовании конической детали (см. рисунки 1.28, 1.29).

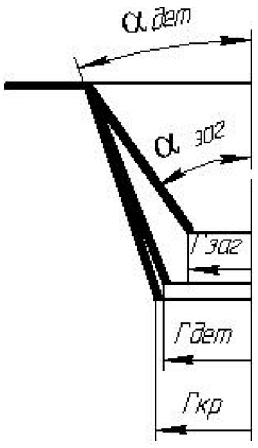

Рисунок 1.28 – Схема определения пружинения в процессе отбортовки

Определим по известным формулам пружинение кромки при отбортовке, когда схема напряженно-деформированного состояния близка к линейной: ($\sigma_S \approx \sigma_\rho = 0$, $\sigma_\theta \neq 0$, $e_\rho = e_S$, $e_\theta = -2e_\rho = -2e_S$).

Известно, что величина упругой деформации:

$$e_{упр} = \frac{\sigma_{iкромки}}{E}, \tag{1.7}$$

где $\sigma_{iкромки} = \sigma_{T_O} + \Pi e_{\theta iкромки} = \sigma_{T_O} + \Pi \ln \left| \frac{r_{кромки}}{r_{заг}} \right|$;

$\sigma_{iкромки}$ – интенсивность напряжений на кромке детали;

$e_{упр}$ – упругая деформация разгрузки;

E – модуль упругости;

$r_{кромки}$ – радиус кромки;

$r_{заг}$ – радиус заготовки.

С другой стороны упругая разгрузка приводит к уменьшению радиуса кромки, так как:

$$e_{упр} = \ln \left| \frac{r_{дет}}{r_{кромки}} \right|, \tag{1.8}$$

где $r_{дет}$ – радиус детали.

Следовательно, радиус детали из равенства формул (1.7) и (1.8):

$$r_{дет} = r_{кромки} \cdot \exp\left(-\frac{\sigma_{iкромки}}{E} \right).$$

Разница в радиусах составит:

$$\Delta r = r_{кромки} - r_{дет} = r_{кромки} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{iкромки}}{E} \right) \right]. \tag{1.9}$$

Надо иметь ввиду, что для кромки при отбортовке $\sigma_{iкромки} = \sigma_{\theta кромки}$.

Рассмотрим процесс формовки (см. рисунок 1.29).

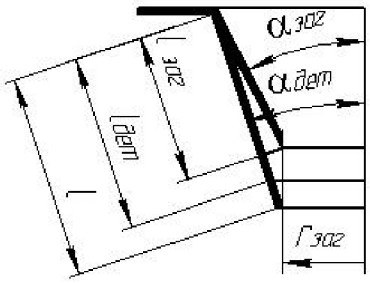

Рисунок 1.29 – Схема определения пружинения в процессе формовки

При одинаковой интенсивности напряжений в отдельно рассматриваемых процессах отбортовки и формовки, тангенциальные напряжения в процессе отбортовки в 2 раза больше, чем в процессе формовки (соответственно и уменьшение радиуса кромки). При формовке для изотропного тела:

$$\sigma_{\rho кромки} = 2\sigma_{\theta кромки}.$$

Так как $\sigma_{iкромки} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_{\rho кромки}$, то

$$\sigma_{\rho кромки} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{iкромки} = 2\sigma_{\theta кромки},\ \sigma_{\theta кромки} = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{iкромки} = 0,5\sigma_{iкромки}.$$

Даже если считать, что пружинение зависит только от тангенциальных напряжений, то разница в радиусах составит:

$$\Delta r_{ф} = r_{кромки}\left[1-\exp\left(-\frac{\sigma_{iкромки}}{2E}\right)\right]. \qquad (1.10)$$

Анализируя (1.9) и (1.10), видим, что величина пружинения при формовке меньше величины пружинения при отбортовке:

$$\Delta r_{ф} < \Delta r.$$

Активные силы трения приводят к равномерной толщине изделия, но недостаток известного устройства (см. рисунок 1.27) заключается в том, что нет возможности получения деталей вогнутой формы, отсутствует методика проектирования техпроцесса. За счет отбортовки и утонения имеют место трудности в получении постоянной толщины при последующей формовке.

- Задача получения деталей выпуклой формы с постоянной толщиной может быть решена новым способом [68]. Устройство состоит (см. рисунок 1.30) из контейнера 1, внутри которого расположен выталкиватель 2. На верхнюю часть контейнера опирается матрица 3, во внутреннюю рабочую полость которой входит прижим 4. Пуансон 5 перемещается по внутренней поверхности заготовки 6, после того как последняя зажимается по большому торцу между матрицей 3 и прижимом 4. На выталкивателе 2 расположен эластичный элемент 7, выполненный в виде кольца с прямоугольным сечением, высота которого составляет не более половины рабочей части пуансона, при этом наружный диаметр эластичного элемента равен внутреннему диаметру подкладной плиты, а внутренний диаметр эластичного элемента на 15-25% больше внутреннего диаметра выталкивателя. Усилие сжатия прикладывается от толкателя 8 через шпильки 9, заходящие в отверстия, от плоского фланца пуансона 5.

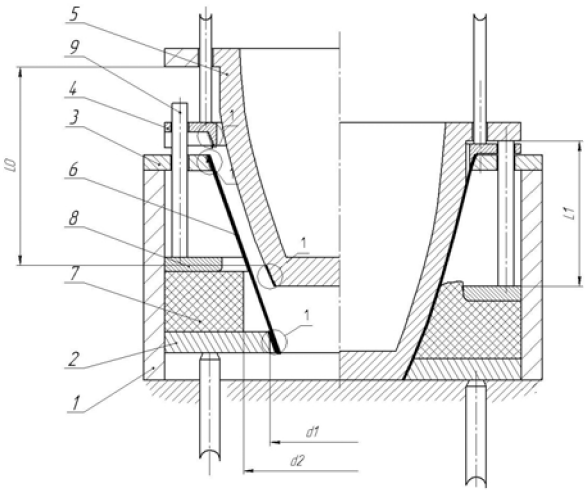

Рисунок 1.30 – Схема устройства для реализации способа отбортовки-формовки с эластичным элементом

Устройство работает следующим образом. Коническая полая заготовка 6 устанавливается в устройство и фиксируется за большой торец между рабочей матрицей 3 и прижимом 4. Для более надёжной фиксации заготовки поверхность инструмента в местах зажима заготовки имеет мелкую насечку.

При рабочем ходе пуансона 5 осуществляется деформирование путём отбортовки и осевого растяжения. Усилие осевого растяжения возникает лишь между пуансоном 5 и большим торцом заготовки, поскольку её малый торец в течение стадии деформировался свободно от зажима. В тот момент, когда нижняя поверхность фланца пуансона 5 достигает уровня дополнительных шпилек 9, усилие от пуансона начинает передаваться на эластичный элемент 7, деформируя его. Деформация его заключается в осадке – уменьшении высоты и увеличении широтных размеров. При этом увеличиваются и размеры самой заготовки, происходит деформация в условиях схемы напряженно-деформированного состояния, соответствующего процессу формовки. Т.е. деформирование происходит за счет утонения заготовки. Это обеспечивается тем, что длина шпильки 9 $L1$ несколько больше, чем длина рабочей части пуансона $L0$. При дальнейшем ходе пуансона 5 происходит деформирование заготовки 6, в очаг деформации включается вся большая часть заготовки, и всё больше увеличивает свои размеры эластичный элемент. Перед завершением процесса деформирования заготовки, когда пуансон достигает нижнего выталкивателя, происходит зажим заготовки по малому торцу между нижней частью пуансона 5 и выталкивателем 2. С этого момента усилие растяжения вдоль образующей прикладывается к обоим торцам заготовки. Величина деформации эластичного элемента 7, установленного внутри подкладной плиты, зависит от его исходной высоты, а также от длины дополнительных толкателей, через которые усилие деформирования передаётся на эластичный элемент. При сжатии элемента 7 заготовка 6 прижимается к рабочей поверхности пуансона 5. Силы трения, возникающие между заготовкой 6 и пуансоном 5, блокируют перемещение элементов заготовки 6, находящихся на ее меньшем основании, и препятствуют утонению заготовки. Увеличивается растяжение и утонение элементов заготовки, примыкающих к большому основанию, в результате чего равномерность толщины стенки штампованной детали значительно повышается.

Недостатки устройства заключаются в сложности конструкции и механизма, в трудности согласования необходимого сжатия эластичного элемента и перемещений пуансона и толкателей.

Надо отметить, что в двух последних способах процесс отбортовки нецелесообразен, так как он усложняет возможность достижения равномерной толщины детали. При этом важным фактором в рассматриваемых способах является трение [15,27,29,41,51,84]. В источниках [26,77] приведена величина коэффициента трения со смазкой и без смазки.

Таблица 1.4 – Величины коэффициентов трения со смазкой и без смазки

Условия процесса	Коэффициенты трения в зависимости от вытягиваемых материалов		
	Сталь 08ВГ	Алюминий	Дуралюмин Д16 М
Без смазки	0,18-0,20	0,25	0,22
Смазка – минеральное масло (машинное, веретенное)	0,14-0,16	0,15	0,16
Смазка с наполнителями (мел, графит)	0,06-0,1	0,1	0,08-0,1

В работе [61] проведены эксперименты и определен коэффициент трения при различных условиях трения на поверхности контакта нержавейки и инструментальной стали. Полученные результаты представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Значения коэффициентов трения на поверхности контакта нержавейки и инструментальной стали

Условия трения	Величина нормального усилия (Н)	Коэффициент трения
Без смазки	180	0,24
-	500	0,23
Сухое детское мыло	180	0,14
-	500	0,11
Жидкое мыло и порошок политетрафторэтилен	180	0,19
-	500	0,15
Лак Цапон-10 и сухое мыло	320	0,07
-	500	0,07

2 Теоретический анализ процесса формовки

2.1 Механизм нового способа формовки и условие минимальной разнотолщинности детали

С технической и экономической точек зрения очень важно проектировать технологический процесс так, чтобы он направленно изменял толщину заготовки [32,73]. Для достижения поставленной цели предлагается усовершенствованное устройство, обладающее большими возможностями и более простым механизмом формообразования тонкостенных осесимметричных деталей с использованием процесса формовки. На рисунке 2.1 показаны устройства для промышленного производства соответственно выпуклых и вогнутых тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы (слева от оси в открытом, а справа от оси в закрытом положении) [34,35,69].

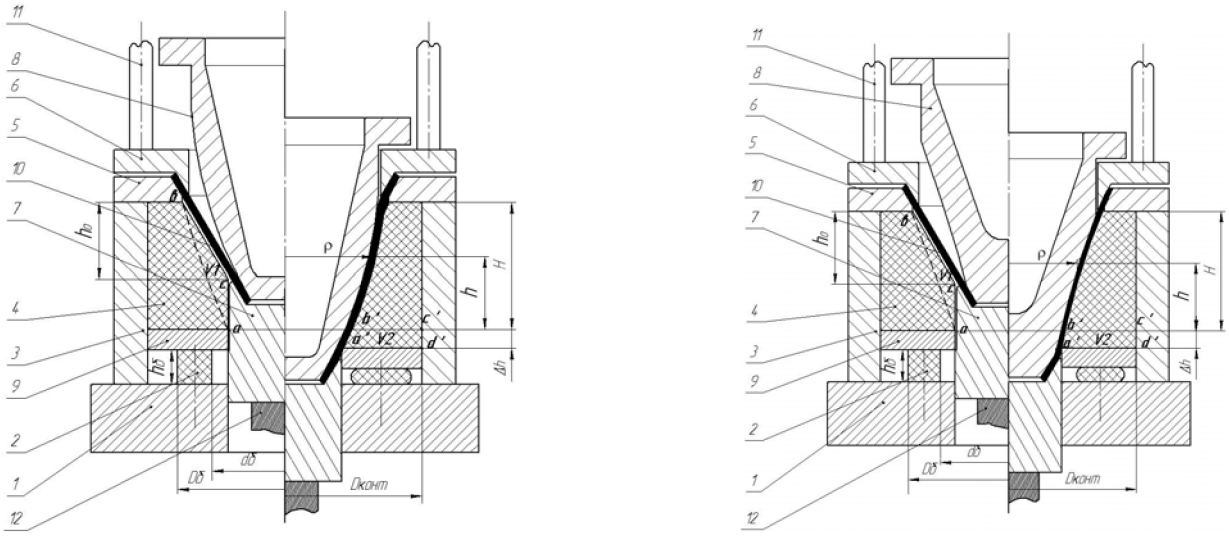

Рисунок 2.1 – Схемы устройств для формообразования выпуклых и вогнутых тонкостенных деталей: 1 – плита штампа; 2 – эластичный буфер; 3 – контейнер; 4 – эластичный элемент; 5 – матрица; 6 – прижим; 7 – выталкиватель; 8 – пуансон; 9 – подкладная плита; 10 – заготовка; 11 – шпилька прижимного устройства; 12 – шпилька буферного устройства

Устройство, содержащее пуансон 8, контейнер 3, прижим 6, выталкиватель 7, матрицу 5, согласно модели, снабжено плитой штампа 1, на которую установлен контейнер 3, внутри него на плите штампа расположен эластичный элемент 4, размещённый на подкладной плите. Давление эластичным элементом создается с помощью подкладной плиты, усилие подпора которой определяется с помощью буферного устройства (либо пресса, либо штампа, что определяется необходимостью промышленного производства или эксперимента). Эластичный элемент выполнен в виде кольца прямоугольного сечения высотой H, которая больше на 5-10% рабочей части поверхности пуансона, со срезанной со стороны пуансона частью в виде конического сечения с углом конусности равным углу конусности заготовки. Больший диаметр эластичного элемента равен внутреннему диаметру матрицы, а меньший диаметр равен диаметру выталкивателя. Заготовка, в виде усечённого конуса устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 5, а прилегающими к торцу меньшего основания, – на выталкиватель 7. Затем заготовка зажимается по внутренним поверхностям к матрице 5 прижимом 6, а к выталкивателю 7 пуансоном 8. Инструмент, где происходит зажим заготовки, выполнен с рабочими поверхностями, имеющими конусность, совпадающую с конусностью заготовки. Такая геометрия позволяет надежно закрепить заготовку до момента пластического деформирования. Пуансон перемещается вниз, вытесняя часть объема эластичного элемента V_1, который перемещает подкладную плиту 9 вниз. Давление, которое создается внутри эластичного элемента, определяется усилием подпора буферного устройства пресса. Происходит пластическая деформация заготовки в условиях плоского растяжения и значительных активных сил трения между пуансоном и заготовкой. Процесс пластического формообразования производится до полного прилегания заготовки по всей поверхности пуансона, формирующей размеры готовой детали, и ограничен величиной утонения заготовки в зоне опасного сечения наименьшего

диаметра. На поверхности контакта эластичного элемента и заготовки действуют реактивные силы трения, так как перемещение эластичного элемента отстает от заготовки. Создание активных сил трения на рассматриваемой поверхности, когда перемещение эластичного элемента опережает перемещение заготовки, возможно при относительно малых объемах эластичного элемента. Однако при этом, отношение вытесненного объема V_1 к объему всего эластичного элемента превышает допустимый предел его деформирования: 25-30%. На поверхности контакта пуансона и заготовки действуют активные силы трения, которые перераспределяют напряжения в меридиональном направлении σ_ρ, уменьшая их в зоне наименьшего диаметра и увеличивая в зоне наибольшего диаметра. Создав их преобладающее влияние, возможно получить минимальную разнотолщинность. Используя аналитическую зависимость (1.6), условие для осесимметричной детали может быть представлено как:

$$\int_l (S_T - S_{зад})^2 dl \to \min, \qquad (2.1)$$

где l – длина образующей детали.

Выражение (2.1) является функционалом [44]. Он требует приближение технологически возможной толщины S_T к заданной толщине детали $S_{зад}$ при условии минимального отклонения как со стороны положительной, так и отрицательной разницы между двумя функциями толщин. Выполнение условия (2.1) дает возможность увеличить КИМ, уменьшить трудоемкость и повысить эксплуатационные характеристики детали, что доказано в работах [12,73,74].

Заданная толщина детали может быть установлена, исходя из технологических или эксплуатационных (конструкторских) требований. К технологическим требованиям относятся: увеличение степени деформирования, коэффициента использования металла, снижение фестонистости и т.п. Для нашего случая $S_{зад} = S_{дет} = \text{const}$.

2.2 Анализ напряженно-деформированного состояния процесса формовки

Для определения давления процесса формовки введем некоторые допущения.

2.2.1 Основные допущения

2.2.1.1 Допущение о плоско-деформированном состоянии

В области элементов близких к зажимам заготовки, так и промежуточных, имеет место тангенциальная деформация близкая к нулю, т.е. $e_\theta \approx 0$.

Проверим условие плоско-деформированного состояния в случае получения постоянной толщины для деталей разных форм и определим максимально возможную погрешность допущения о плоско-деформированном состоянии для предельных случаев формовки:

а) Коническая деталь (см. рисунок 2.2).

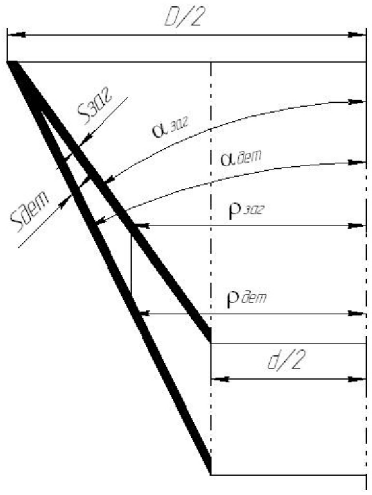

Рисунок 2.2 – Деталь конической формы: D – диаметр большего основания детали; d – диаметр меньшего основания детали; $\alpha_{заг}$ – угол конусности заготовки; $\alpha_{дет}$ – угол конусности полученной детали; $\rho_{заг}$ – координата элемента по радиусу до формообразования; $\rho_{дет}$ – координата того же элемента по радиусу после формообразования

Основой расчета является постоянство объема металла заготовки и детали:

$$V_{заг} = V_{дет},$$

$$F_{заг}S_{заг} = F_{дет}S_{дет}, \qquad (2.2)$$

где $V_{заг}$, $V_{дет}$ – объем заготовки, объем детали;

$F_{заг}$, $F_{дет}$ – площадь заготовки, площадь детали;

$S_{заг}$, $S_{дет}$ – толщина заготовки, толщина детали.

Считаем, что диаметры D и d соответственно равны большему и меньшему диаметрам основания заготовки без учета припуска под зажимы и не меняются в процессе формообразования.

$$F_{заг} = \frac{\pi(D+d)}{2} \cdot \frac{D-d}{2\sin\alpha_{заг}} = \frac{\pi\left(D^2-d^2\right)}{4\sin\alpha_{заг}}. \qquad (2.3)$$

Запишем (2.2) с учетом (2.3):

$$\frac{\pi\left(D^2-d^2\right)}{4\sin\alpha_{заг}} S_{заг} = \frac{\pi\left(D^2-d^2\right)}{4\sin\alpha_{дет}} S_{дет}. \qquad (2.4)$$

Из соотношения (2.4) определим:

$$S_{дет} = S_{заг}\frac{\sin\alpha_{дет}}{\sin\alpha_{заг}}. \qquad (2.5)$$

Условие постоянства объема запишем с учетом (2.5):

$$\frac{\pi\left(D^2-4\rho_{заг}^{\ 2}\right)}{4\sin\alpha_{заг}} S_{заг} = \frac{\pi\left(D^2-4\rho_{дет}^{\ 2}\right)}{4\sin\alpha_{дет}} S_{дет} = \frac{\pi\left(D^2-4\rho_{дет}^{\ 2}\right)}{4\sin\alpha_{дет}} S_{заг}\frac{\sin\alpha_{дет}}{\sin\alpha_{заг}}.$$

Из полученного соотношения, в котором левая и правая части одинаковы, можно сделать вывод: $\rho_{заг} = \rho_{дет}$.

Таким образом, координаты элемента до и после формообразования равны.

б) Выпуклая деталь.

Форму детали представим в виде шаровой поверхности с относительными размерами $\frac{R}{r} \le 1{,}5 \div 2$ (см. рисунок 2.3). Угол между осью симметрии и касательной, проведенной к образующей меньшего основания,

равен углу конусности заготовки. Это равенство определено условием захвата заготовки в момент начала деформирования. По условиям процесса большее и меньшее основания не меняют свои размеры до конца формообразования, т.е. радиус меньшего основания конуса равен радиусу меньшего основания детали, а радиус большего основания конуса равен радиусу большего основания детали.

Рассмотрим случай, как изменятся координаты элемента с радиусом $\rho_{заг}$ в случае, когда он займет положение на готовой детали при условии, что толщина полученной детали утонилась и представляет собой постоянную величину. Значение этой величины находится из известных форм заготовки, детали и условия постоянства объемов по известному значению толщины заготовки.

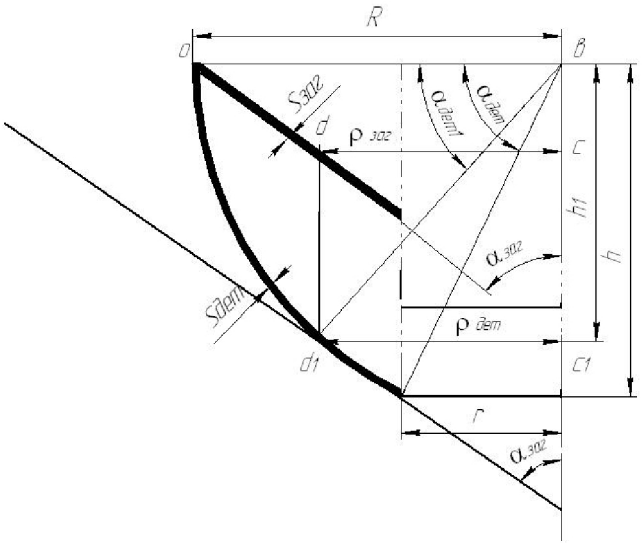

Рисунок 2.3 – Деталь шарообразной формы:
h_1 – расстояние от большего основания до рассматриваемого элемента после формообразования; h – высота полученной детали; R – радиус большего основания детали; r – радиус меньшего основания детали; $\alpha_{дет}$ – угол, образованный кромкой детали большего основания и радиусом, проведенным в точку детали, полученной смещением меньшего основания после формообразования; $\alpha_{заг}$ – угол конусности заготовки; $\alpha_{дет1}$ – угол, образованный кромкой детали большего основания и радиусом, проведенным в точку детали радиусом $\rho_{дет}$, полученной смещением после формообразования из точки заготовки радиусом $\rho_{заг}$

Определим из геометрических соотношений:

$$V_{заг} = \frac{2\pi(R+r)}{2} \cdot \frac{(R-r)}{\sin\alpha_{заг}} \cdot S_{заг} = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{\sin\alpha_{заг}} \cdot S_{заг}, \qquad (2.6)$$

$$V_{дет} = 2\pi RhS_{дет},$$

при $h = R\sin\alpha_{дет}$

$$V_{дет} = 2\pi R^2 \sin\alpha_{дет} S_{дет}, \qquad (2.7)$$

где $V_{дет}$ - объем сферической части детали;

$V_{заг}$ - объем заготовки.

Приравняв выражения (2.6) и (2.7) определим толщину детали:

$$S_{дет} = \frac{(R^2 - r^2)}{2\sin\alpha_{заг} R^2 \sin\alpha_{дет}} \cdot S_{заг}. \qquad (2.8)$$

Рассматривая предельный случай формовки из конической заготовки в деталь сферической формы, мы имеем величину максимального утонения заготовки $\frac{S_{заг}}{S_{дет}} = 2$ независимо от отношения $\frac{r}{R}$. Действительно, исходя из геометрических соотношений и зависимости (2.8) при $\sin\alpha_{заг} = \sin\alpha_{дет} = \sqrt{1-\cos^2\alpha_{дет}} = \sqrt{1-\left(\frac{r}{R}\right)^2}$ имеем:

$$\frac{S_{заг}}{S_{дет}} = 2.$$

Соотношение между координатами элементов на заготовке и на детали найдем из условия постоянства объемов частей заготовки и детали. Объем части заготовки, ограниченный сечением *obcd*, равен $V_{\rho_{заг}} = V_{obcd}$:

$$V_{\rho\,заг} = \frac{\pi\left(R^2 - \rho_{заг}^2\right)}{\sin\alpha_{заг}} \cdot S_{заг}, \qquad (2.9)$$

где ρ – текущий радиус.

Объем части детали, ограниченный сечением obc_1d_1, равен $V_{\rho_{дет}} = V_{obc1d1}$:

$$V_{\rho_{дет}} = 2\pi R^2 S_{дет} \sin\alpha_{дет1} . \qquad (2.10)$$

Используем зависимости:

$$h_1 = \sqrt{R^2 - \rho_{дет}^2} ,$$

$$h = \sqrt{R^2 - r^2} .$$

Приравняв объемы (2.9) и (2.10), находим связь между $\rho_{заг}$ и $\rho_{дет}$:

$$\rho_{заг} = \sqrt{R^2 - \sqrt{(R^2 - r^2)(R^2 - \rho_{дет}^2)}} . \qquad (2.11)$$

Далее определим относительную разницу (погрешность) между координатами одного и того же элемента на заготовке и детали.

$$\xi = \frac{\rho_{дет} - \rho_{заг}}{\rho_{дет}} . \qquad (2.12)$$

Подставив (2.11) в (2.12), получим:

$$\xi = \frac{x - \sqrt{1 - \sqrt{\psi \cdot (1 - x^2)}}}{x} ,$$

где $x = \frac{\rho_{дет}}{R}$,

$$\psi = \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right).$$

Найдем координату элемента, при которой ξ имеет максимум. Для этого возьмем $\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0$. После ряда преобразований имеем:

$$\frac{\rho_{дет}}{R} = x_{\min} = \sqrt{1 - \frac{B^2}{\psi}} ,$$

где $B = y = \frac{\psi}{1 - 2\psi} - \sqrt{\frac{\psi^2}{(1 - 2\psi)^2} + \frac{\psi^2}{1 - 2\psi}}$.

Так как рассматриваемое утонение применимо к случаю очень пластичного материала и при этом r/R не превышает $1/2$, мы получаем, что

разница в радиусах для этого случая будет соответствовать $x_{\min} = 0{,}92$ и $\xi \approx 11{,}6\,\%$. Для большинства рассматриваемых деталей выпуклой формы, радиус кривизны которой значительно превышает радиус детали, эта погрешность будет намного меньше (составит 5-6%).

в) Вогнутая деталь (см. рисунок 2.4).

Проведя аналогичные рассуждения, мы получаем связь между координатами одного и того же элемента до и после деформации:

$$\rho_{заг} = \sqrt{r^2 + \frac{\left(2\pi R_0 \cdot r\alpha_{дет1} - 2r^2 \sin\alpha_{дет1}\right)}{2\pi R_0 \cdot r\alpha_{дет} - 2r^2 \sin\alpha_{дет}}}\,.$$

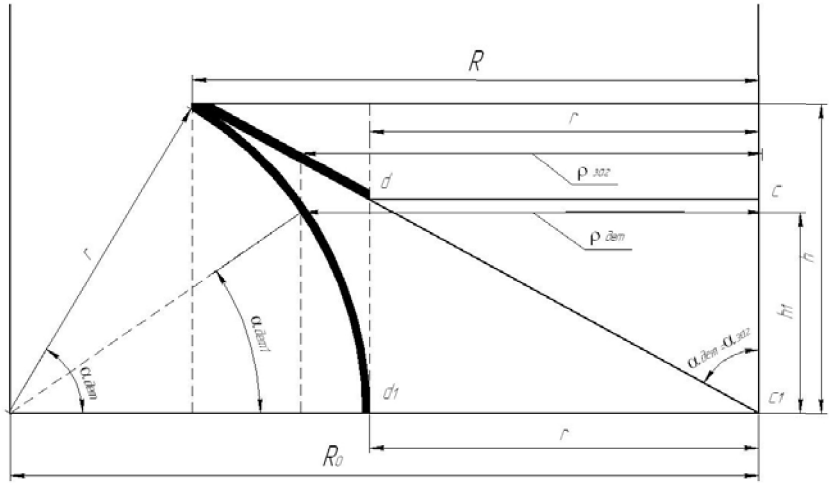

Рисунок 2.4 – Деталь вогнутой формы:
$\alpha_{дет1}$ – координата рассматриваемого элемента на детали; R_0 – расстояние между осями наружных радиусов (характеризующих вогнутость); h_1 – расстояние от меньшего основания до рассматриваемого элемента после формообразования

Найдем относительную разницу (погрешность) между координатами одного и того же элемента на заготовке и детали. Анализ показывает: ξ имеет экстремум. В явном виде найти координату затруднительно. Построим график $\alpha_{дет1}$ от ξ (см. рисунок 2.5).

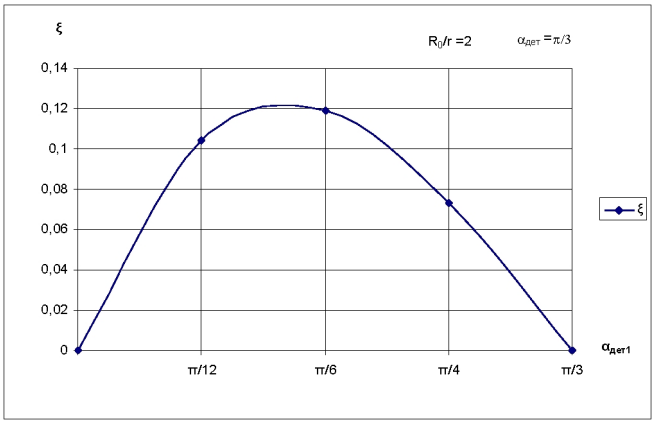

Рисунок 2.5 – Оценка погрешности между координатами

Мы видим, что при значениях близких к $\frac{\pi}{6}$, погрешность составляет около 12% (при условии возможного формообразования реальных металлов при утонении, составляющем 40-45% и $R_0/r = 2$, $R/r = 1{,}5$), что вполне допустимо, поскольку рассмотрен самый экстремальный случай процесса [33].

На основании предложенных расчетов приходим к заключению, что координаты элементов до формообразования и после по радиусу имеют близкие значения, т.е. размеры по диаметрам кромки меняются незначительно. Поэтому принимаем тангенциальную деформацию по всей длине образующей близкой к нулю:

$$e_\theta \approx 0 . \qquad (2.13)$$

В таком случае принимаем схему плоско-деформированного состояния, когда деформации по толщине равны и противоположны по знаку меридиональным деформациям. Из условия постоянства объема, с учетом (2.13) получаем:

$$e_\rho = -e_S . \qquad (2.14)$$

2.2.1.2 Учет упрочнения

Упрочнение металла представляется в виде линейной функции [36,37,56,60]. Эта зависимость достаточно точна, если исходить из того,

чтобы величина накопленной деформации была близка к реальной на заданном интервале деформирования [37]:

$$\sigma_S = \sigma_{T_O} + \Pi e_i, \tag{2.15}$$

где e_i – интенсивность деформаций на рассматриваемом интервале деформирования;

Π – модуль упрочнения;

σ_S – напряжение текучести;

σ_{T_O} – экстраполированный предел текучести.

Константы упрочнения линейной зависимости определяются следующим образом: постоянные значения σ_{T_O} определяются из условия прохождения линейной зависимости через условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, а константу, характеризующую степень упрочнения Π, определяем путем минимизации линейной зависимости либо относительно экспериментальных данных, либо относительно широко распространенной аналитической зависимости кривой упрочнения степенного вида [39,52,53]:

$$\sigma_S = Ae_i^n, \tag{2.16}$$

где константы упрочнений штампуемого материала вычисляются по формулам:

$$n = \frac{\ln\left|\dfrac{\sigma_{0,2}}{\sigma_ш}\right|}{\ln\left|\dfrac{0,002}{\delta_\rho}\right|}, \tag{2.17}$$

$$A = \frac{\sigma_ш}{\delta_\rho^n}, \tag{2.18}$$

где напряжения в момент появления шейки равны:

$$\sigma_ш = \sigma_в\left(1+\delta_\rho\right). \tag{2.19}$$

Механические свойства материала $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ_ρ берутся по результатам проводимых испытаний образца, либо по таблицам.

С учетом сказанного, условие минимизации определим, используя метод наименьших квадратов [45]:

$$\int_m^d \left[Ae_i^n - \left(\sigma_{0,2} - \Pi \cdot 0,002\right) - \Pi e_i \right]^2 de_i \to \min,$$

где m,d – пределы интегрирования, которые конкретно определяются при решении заданной задачи: $m = 0,002$, $d = \delta_p$ – равномерное удлинение.

$$\frac{\partial}{\partial b}\int_m^d \left[\left(Ae_i^n - \sigma_{0,2} - \Pi\left(e_i - 0,002\right)\right)\left(-e_i\right)\right] de_i = 0,$$

$$\Pi = \frac{-\sigma_{0,2}\int_m^d e_i de_i + A\int_m^d e_i^{n+1} de_i}{\int_m^d e_i^2 de_i - 0,002\frac{e_i^2}{2}}, \tag{2.20}$$

$$\sigma_{T_O} = \sigma_{0,2} - \Pi \cdot 0,002. \tag{2.21}$$

2.2.1.3 Допущение о создаваемом давлении эластичным элементом

Следует предположить, что давление, создаваемое эластичным элементом должно увеличиться для случая больших напряжений и уменьшиться для случая применения более тонких заготовок. Другими словами давление, как и в уравнении Лапласа [83] выражено через параметры σ_ρ и S_T. Наиболее просто такую зависимость можно представить в виде функции:

$$q = k\sigma_\rho S_T, \tag{2.22}$$

где k – коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента;

σ_ρ – напряжения в меридиональном направлении;

S_T – технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки.

2.2.1.4 Традиционные допущения

- Материал считаем трансверсально-изотропным телом [82].
- Трение учитывается по закону Кулона.

2.2.2 Определение напряжений и деформаций процесса

Используя инженерный метод решения для получения деталей с минимальной разнотолщинностью, выполняем условие (2.1). Для решения функционала необходимо найти технологическую толщину S_T с учетом принятых допущений. Минимизацию выражения (2.1) как функционала можно провести по технологическим параметрам постоянным в процессе формообразования. К ним относятся: исходная толщина заготовки, коэффициенты формообразования, геометрические параметры, оснастка, коэффициент трения, коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента и показатели механических свойств, в том числе показатель трансверсально-изотропного металла, возможности которого определены природной основой материала. Минимизацию функционала можно проводить по всем параметрам одновременно, но с целью упрощения решения в рамках рассматриваемой погрешности достаточно выявить условия и параметры их определяющие, наиболее сильно влияющие на изменения толщины и просто поддающиеся регулированию. Как показал анализ, к таким условиям относятся условия трения, которые можно определить коэффициентом трения и давлением на поверхности заготовки и инструмента, в том числе и внешним давлением. Если рассматриваемые параметры переменны в процессе формообразования и представлены в виде функции, то минимизацию функционала следует проводить по тем значениям, которые содержатся в функции в виде постоянных [18,25,82]. При решении инженерным методом, уравнение равновесия в полярной системе координат для случая формообразования заготовки в заключительной стадии процесса с использованием эластичного элемента примет вид [83,71]:

$$\rho\frac{d\sigma_\rho}{d\rho}+\sigma_\rho-\sigma_\theta-\frac{f\rho}{\sin\alpha}\left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho}+\frac{q\left(1-\frac{f_1}{f}\right)}{S_T}+\frac{\sigma_\theta}{R_\theta}\right)=0, \qquad (2.23)$$

где q – давление, создаваемое эластичным элементом;

R_ρ – радиус детали в меридиональном направлении;

R_θ – радиус детали в тангенциальном направлении;

μ – коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;

σ_ρ – напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ – напряжения в тангенциальном направлении;

f_1 – коэффициент трения между поверхностями заготовки и эластичным элементом;

f – коэффициент трения между поверхностями инструмента и заготовки;

α – угол наклона к касательной, проведенной к рассматриваемому элементу образующей с координатой ρ.

Отличается представленное уравнение от известного тем, что на поверхностях заготовки действуют силы трения во взаимно-противоположных направлениях: на внутренней поверхности контакта заготовки и пуансона – активные силы, на наружной поверхности контакта заготовки с эластичным элементом – реактивные силы.

Из уравнения связи напряжений и деформации для трансверсально-изотропного металла [17,18,25] при условии (2.13) имеем:

$$\sigma_\theta=\mu\sigma_\rho. \qquad (2.24)$$

Для трансверсально-изотропного тела в случае плоско-деформированного состояния, когда тангенциальные деформации равны нулю $e_\theta\approx 0$, а деформации по толщине равны и противоположны по знаку меридиональным деформациям (2.14) [80], с учетом условия (2.24) и условия постоянства объема [18,19,25,80]:

$$e_i = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}}\left|e_S\right|, \tag{2.25}$$

$$\sigma_S = \sigma_\rho \sqrt{1-\mu^2}\,. \tag{2.26}$$

где e_S – деформация по толщине.

Примем в первом приближении:

$$e_S = \ln\left|\frac{S_{заг}}{S_{дет}}\right| \approx \frac{S_{заг} - S_T}{S_{заг}}. \tag{2.27}$$

Для изотропного тела, которое является частным случаем трансверсально-изотропного, когда $\mu = 0{,}5$ имеем:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\left|e_S\right|, \tag{2.28}$$

$$\sigma_S = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_\rho\,. \tag{2.29}$$

Рассмотрим случай формовки детали выпуклой формы (см. рисунок 2.6).

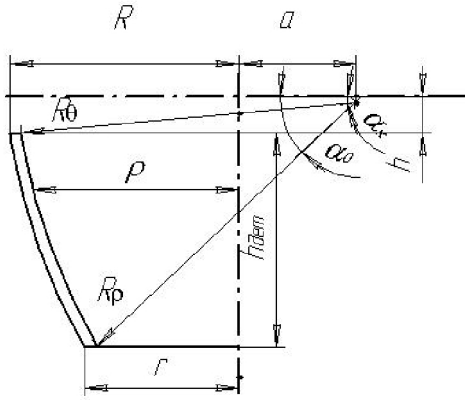

Рисунок 2.6 – Деталь выпуклой формы:
a – расстояние от центра радиуса R_ρ до оси симметрии; $h_{дет}$ – высота полученной детали; R – радиус большего основания детали; r – радиус меньшего основания детали; R_ρ – радиус детали в меридиональном направлении; R_θ – радиус детали в тангенциальном направлении; h – расстояние от кромки детали большего основания до оси, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали; $\alpha_к$ – угол, образованный радиусом R_ρ, проведенным к кромке детали большего основания, и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали

Согласно рисунку 2.6 из геометрических соотношений:

$$R_\theta = \frac{\rho}{\cos\alpha_0}, \tag{2.30}$$

$$\sin\alpha_0 = \frac{h_{дет}+h}{R_\rho}, \tag{2.31}$$

$$\cos\alpha_0 = \sqrt{1-\sin^2\alpha_0}, \tag{2.32}$$

где α_0 – угол, образованный радиусом R_ρ, проведенным к кромке детали меньшего основания, и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали.

Учитывая выражения (2.22) и (2.30), уравнение равновесия (2.23) при использовании эластичного элемента примет вид:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho}+\sigma_\rho\left[\frac{(1-\mu)}{\rho}-\frac{f}{\sin\alpha}\left(k\left(1-\frac{f_1}{f}\right)\pm\frac{1}{R_\rho}\right)-\frac{f\,\mu\,\mathrm{ctg}\alpha}{\rho}\right]=0,$$

где $\pm$ – знаки, определяющие форму детали.

Разделим переменные:

$$\frac{d\sigma_\rho}{\sigma_\rho}=-\frac{(1-\mu)}{\rho}d\rho+\frac{f}{\sin\alpha}\left(k\left(1-\frac{f_1}{f}\right)\pm\frac{1}{R_\rho}\right)d\rho+\frac{f\,\mu\,\mathrm{ctg}\alpha\cdot d\rho}{\rho}. \tag{2.33}$$

Проинтегрируем выражение (2.33), приняв согласно теореме о среднем [44]:

$$\alpha=\mathrm{arctg}\left(\frac{R-r}{h_{дет}}\right), \tag{2.34}$$

$$\ln|\sigma_\rho|=\ln|\rho|^{\mu-1}+f\,\mu\,\mathrm{ctg}\alpha\ln|\rho|+\frac{f}{\sin\alpha}\left(\frac{k\left(1-\frac{f_1}{f}\right)}{\frac{1}{R_\rho}}\pm1\right)\left(\frac{\rho}{R_\rho}\right)+C.$$

Найдя произвольную постоянную интегрирования, определенную из граничного условия, согласно которому при $\rho=r$, напряжение $\sigma_\rho=\sigma_\rho^*$, уравнение (2.33) примет вид:

$$\ln\left|\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\rho^*}\right| = \ln\left|\frac{\rho}{r}\right|^{\mu-1} + f\mu\operatorname{ctg}\alpha\ln\left|\frac{\rho}{r}\right| + \frac{f}{\sin\alpha}\left(\frac{k\left(1-\frac{f_1}{f}\right)}{\frac{1}{R_\rho}}\pm 1\right)\frac{r}{R_\rho}\left(\frac{\rho}{r}-1\right). \qquad (2.35)$$

Для плоско-деформированного состояния при граничном условии, когда $\sigma_\rho = \sigma_\rho^*$, $S_T = S_{дет}$, величину σ_ρ^* находим по известному значению толщины детали и найденной толщине заготовки, используя зависимости кривой упрочнения линейного типа (2.15), (2.26), (2.27).

$$\sigma_\rho^* = \frac{\sigma_{T_0}}{\sqrt{1-\mu^2}} + \frac{\Pi}{1-\mu^2}\left(\frac{S_{заг}-S_{дет}}{S_{заг}}\right), \qquad (2.36)$$

где $S_{заг}$, $S_{дет}$ – известные значения толщин.

Введем безразмерные величины $S'_{дет} = \frac{S_{дет}}{R_\rho}$, $r' = \frac{r}{R_\rho}$, $\rho' = \frac{\rho}{R_\rho}$ и преобразуем выражение (2.35):

$$\ln\left|\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\rho^*}\cdot\left(\frac{\rho}{r}\right)^{1-\mu-f\operatorname{ctg}\alpha\mu}\right| = \frac{f}{\sin\alpha}\left(k\left(1-\frac{f_1}{f}\right)\pm 1\right)r\left(\frac{\rho'}{r'}-1\right),$$

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\rho^*}\cdot\left(\frac{\rho}{r}\right)^{1-\mu-f\operatorname{ctg}\alpha\mu} = \exp\left[\frac{f}{\sin\alpha}\left(k\left(1-\frac{f_1}{f}\right)\pm 1\right)r\left(\frac{\rho'}{r'}-1\right)\right]. \qquad (2.37)$$

Разложим правую часть выражения относительно нуля, а левую относительно единицы [50]:

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\rho^*}\left[1+\left(\mu-1+f\operatorname{ctg}\alpha\mu\right)\left(\frac{\rho'}{r'}-1\right)\right] = 1+\frac{fr}{\sin\alpha}\left(k\left(1-\frac{f_1}{f}\right)\pm 1\right)\left(\frac{\rho'}{r'}-1\right). \qquad (2.38)$$

Для преобразования последнего выражения введем обозначения:

$$A = 1-\mu-f\mu\cdot\operatorname{ctg}\alpha, \qquad (2.39)$$

$$Б = \frac{r\cdot f}{\sin\alpha}, \qquad (2.40)$$

$$x = \left(\frac{\rho'}{r'}-1\right). \qquad (2.41)$$

С учетом этого выражение (2.38) примет вид:

$$\sigma_\rho = \sigma_\rho^* \frac{1 + Б\left(k\left(1 - \frac{f_1}{f}\right) \pm 1\right)x}{1 + Ax}. \qquad (2.42)$$

Для трансверсально-изотропного тела в условиях плоско-деформированного состояния зависимость кривой упрочнения примет вид:

$$\sigma_\rho \sqrt{1-\mu^2} = \sigma_{T_o} + П \frac{S_{заг} - S_T}{S_{заг}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}}. \qquad (2.43)$$

Определим технологическую толщину S_T из (2.43):

$$S_T = S_{заг}\left(1 - \frac{\sigma_\rho}{П}\left(1-\mu^2\right) + \frac{\sigma_{T_o}}{П}\sqrt{1-\mu^2}\right).$$

С учетом (2.42):

$$S_T = S_{заг}\left[\frac{\sigma_{T_o}\sqrt{1-\mu^2}}{П} + 1 - \frac{\sigma_\rho^*\left(1-\mu^2\right)}{П}\left[\frac{1 + Б\left(k\left(1 - \frac{f_1}{f}\right) \pm 1\right)x}{1 + Ax}\right]\right], \qquad (2.44)$$

где $\pm$ – знак, определяющий форму детали:

$+$ – выпуклая форма;

$-$ – вогнутая форма.

Выполняя условие (2.1) для осесимметричной задачи (заменив переменную l на x), подставим в него полученное выражение (2.44):

$$\int_0^x \left(S_{заг}\left[\frac{\sigma_{T_o}\sqrt{1-\mu^2}}{П} + 1 - \frac{\sigma_\rho^*\left(1-\mu^2\right)}{П}\left[\frac{1 + Б\left(k\left(1 - \frac{f_1}{f}\right) \pm 1\right)x}{1 + Ax}\right]\right] - S_{дет}\right)^2 dx \to \min. \qquad (2.45)$$

Здесь толщина $S_{дет}$ принимает значение $S_{зад}$. Проводим минимизацию функционала (2.1) по коэффициенту пропорциональности сжатия эластичного элемента k:

$$\frac{\partial}{\partial k}\int_0^x \left\{S_{заг}\left(\frac{\sigma_{T_o}\sqrt{1-\mu^2}}{П} + 1 - b - \frac{\sigma_\rho^*\left(1-\mu^2\right)}{П}\left[\frac{1 + Б\left(k\left(1 - \frac{f_1}{f}\right) \pm 1\right)x}{1 + Ax}\right]\right)\right\}^2 dx = 0, \qquad (2.46)$$

где x – граница интегрирования;

b – коэффициент утонения материала.

$$b = \frac{S_{дет}}{S_{заг}}. \qquad (2.47)$$

Необходимо иметь в виду, что с учетом (2.47) условие (2.36) изменится:

$$\frac{\sigma_{\rho}^{*}\left(1-\mu^{2}\right)}{\Pi} = \frac{\sigma_{T_0}\sqrt{1-\mu^{2}}}{\Pi} + 1 - b. \qquad (2.48)$$

Решение интеграла (2.46) при допустимой замене $\ln|Ax+1| \approx Ax$ преобразуется к виду:

$$k = \frac{\left(1-\mu-f\mu\cdot\mathrm{ctg}\alpha\right)x\cdot\sin\alpha \pm r^{/}f}{r^{/}\cdot R_{\rho}}\cdot\frac{1}{f-f_1}.$$

Дальнейший анализ проводился для случая, охватывающего наиболее часто встречающиеся варианты отношения $\frac{R}{r} \le 2$. Тогда рассчитав по формуле (2.41), имеем x=1, т.е. границы интегрирования будут меняться от 0 до 1. После преобразований (2.46) получаем:

$$k = \frac{\left(1-\mu-f\mu\cdot\mathrm{ctg}\alpha\right)\sin\alpha \pm r^{/}f}{r^{/}\cdot R_{\rho}}\cdot\frac{1}{f-f_1}, \qquad (2.49)$$

где $\pm$ – знак, определяющий форму детали:

$+$ – вогнутая форма;

$-$ – выпуклая форма.

Данное выражение получено для детали выпуклой или вогнутой формы. Для конической детали радиус $R_{\rho} = \infty$. С учетом этого уравнение (2.49) изменит свой вид:

$$k = \frac{1-\mu-\mu f\mathrm{ctg}\alpha}{r}\sin\alpha\cdot\frac{1}{f-f_1}. \qquad (2.50)$$

В формулах (2.49) и (2.50) при условии: $f = f_1$, коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента и следовательно давление, создаваемое эластичным элементом, стремятся к бесконечности. Другими словами, получить деталь при таких условиях трения с постоянной толщиной стенки невозможно. Анализ выражений (2.49) и (2.50) показал: подставив их в формулы (2.42), (2.44), получаем величины практически постоянные, приближенные к граничным условиям. Т.е. давление,

создаваемое эластичным элементом, интенсивность деформаций и механические свойства по всей длине образующей близки к постоянным значениям. Такие условия должны обеспечивать высокие эксплутационные характеристики.

Рассмотрим границы применимости способа формовки с учетом использования эластичного элемента и без него (см. подраздел 2.4, 2.5). Условием отсутствия давления, создаваемого эластичным элементом, является равенство k=0.

2.3 Определение технологических и предельных параметров процесса формовки для получения тонкостенных осесимметричных деталей с постоянной толщиной стенки

2.3.1 Определение усилия процесса формовки и усилия прижима

Рассмотрим схему действия сил на верхнем прижиме (см. рисунок 2.7).

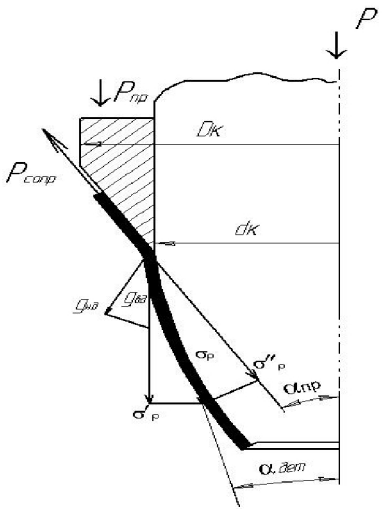

Рисунок 2.7 – Схема действия сил на верхнем прижиме:
P – усилие процесса формовки; $P_{сопр}$ – усилие сопротивления от прижима; $P_{пр}$ – усилие прижима; $\alpha_{дет}$ – угол, образованный касательной, проведенной к образующей детали большего основания, и осью симметрии детали; σ'_{ρ} – вертикальная составляющая напряжения в меридиональном направлении; σ''_{ρ} – напряжение, определяющее величину тянущего усилия из зажимов заготовки; $\alpha_{пр}$ – угол конусности заготовки; $g_{нд}$ – нормальная составляющая от давления прижима; $g_{вд}$ – вертикальная составляющая от давления прижима; $D_к$ – больший диаметр конуса; $d_к$ – меньший диаметр конуса

Усилие процесса формовки деталей определяется:

$$P = \sigma_{\rho}^{/} \pi D S_{дет}, \tag{2.51}$$

где D – диаметр большего основания детали.

Вертикальная составляющая напряжения в меридиональном направлении равна:

$$\sigma_{\rho}^{/} = \sigma_{\rho} \cos \alpha_{дет}, \tag{2.52}$$

где σ_{ρ} – вычисляется по формуле (2.42);

$\alpha_{дет} = \alpha_{к}$ – согласно рисунку 2.6 для выпуклых деталей.

Усилие прижима выбирается из соображений того, чтобы заготовка не смогла из него выскользнуть. Чтобы определить усилие прижима $P_{пр}$, необходимо составить уравнение равновесия между усилием сопротивления фланца заготовки, находящегося под прижимом $P_{сопр}$, и тянущим усилием $P_{тян}$, действующим в противоположном направлении вдоль образующей части заготовки, находящейся под прижимом.

$$P_{пр} = g_{вд} F_{проекция}, \tag{2.53}$$

где $F_{проекция}$ – площадь проекции конуса прижима на горизонтальную плоскость;

$P_{пр}$ – усилие прижима;

$g_{вд}$ – вертикальная составляющая от давления прижима.

Из геометрических соображений:

$$F_{проекция} = \frac{\pi\left(D_{к}^{2} - d_{к}^{2}\right)}{4}, \tag{2.54}$$

$$g_{вд} = \frac{g_{нд}}{\sin \alpha_{пр}},$$

$$g_{нд} = \frac{P_{нпр}}{F_{кон}},$$

где $F_{кон}$ – площадь конической поверхности;

$g_{нд}$ – нормальная составляющая от давления прижима;

$P_{нпр}$ – нормальная составляющая усилия прижима равна:

$$P_{нпр} = \frac{P_{тян}}{f}, \tag{2.55}$$

$$F_{кон} = \frac{\pi\left(D_к^2 - d_к^2\right)}{4\sin\alpha_{пр}}. \tag{2.56}$$

Тянущее усилие определяется:

$$P_{тян} = \sigma_\rho^{//}\pi DS_{дет}, \tag{2.57}$$

где $\sigma_\rho^{//} = \sigma_\rho \cos\left(\alpha_{пр} - \alpha_{дет}\right)$.

Подобные рассуждения применительно к нижнему зажиму приводят к выводу о вычислении по той же формуле, что и (2.53), но с учетом изменения тянущего усилия:

$$P_{тян} = \sigma_\rho^{*}\cos\alpha_{пр} \cdot \pi dS_{дет}, \tag{2.58}$$

где d – меньший диаметр детали.

В случае применения в процессе формовки эластичного элемента, усилие процесса определяется с учетом усилия, создаваемого эластичным элементом.

$$P = \sigma_\rho^{/}\pi DS_{дет} + P_{эл}, \tag{2.59}$$

где $P_{эл}$ – усилие, создаваемое эластичным элементом.

$$P_{эл} = \frac{\pi\left(D^2 - d^2\right)}{4}q, \tag{2.60}$$

где q – давление, создаваемое эластичным элементом (см. формулу 2.22).

Определим необходимое усилие для выбранного оборудования:

$$P_{обор} = 1{,}3P, \tag{2.61}$$

где P – усилие процесса формовки.

Из геометрических соображений определяется усилие эластичного буфера (см. рисунок 2.1):

$$P_б = \frac{\pi\left(D_{конт}^2 - d^2\right)}{4}q\ , \tag{2.62}$$

где $D_{конт}$ – внутренний диаметр контейнера.

2.3.2 Определение величины критической степени деформаций

Наиболее точные значения предельных параметров процесса для случая всестороннего состояния растяжения, используя критерий А.Д.Томленова [25,81,82]:

$$\varepsilon_{S_{кр}} = -\frac{m+1}{2-m}n, \tag{2.63}$$

где n – показатель механических свойств материала;

m – коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$m = \frac{(1+R_L)\cdot R_L \cdot e_\theta + {R_L}^2 e_\rho}{(1+R_L)\cdot R_L \cdot e_\rho + {R_L}^2 e_\theta}, \tag{2.64}$$

где R_L – коэффициент Лэнкфорда, вычисляемый по формуле:

$$R_L = \frac{\mu}{(1-\mu)}. \tag{2.65}$$

2.4 Теоретическая оценка применимости способа с использованием эластичного элемента

Используя формулу (2.49), были построены оценочные зависимости давления, создаваемого эластичным элементом q, от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела μ при реальных значениях коэффициента трения. Оценим влияние угла α и толщины заготовки $S_{заг}$ на величину давления q.

2.4.1 Формовка выпуклой детали

Расчеты проводились для случая формовки выпуклой детали из алюминиевой заготовки: высота детали $H = 25мм$, $R_\rho = 130{,}15мм$, $\alpha = 17°$. Результаты в виде графиков представлены на рисунке 2.8.

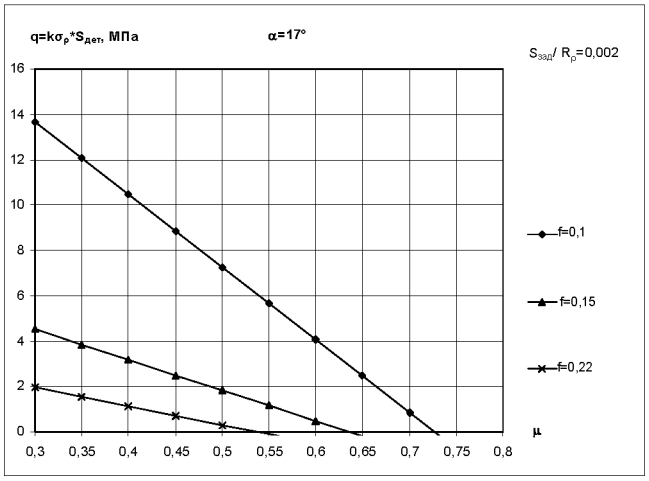

Рисунок 2.8 – Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 17°$ для выпуклой детали, полученной из алюминиевого сплава при $S_{заг} / D = 0{,}00345$

Расчеты проводились для случая формовки выпуклой детали из алюминиевой заготовки при прочих равных условиях для $\alpha = 8{,}6^{\circ}$. Результаты в виде графиков представлены на рисунке 2.9.

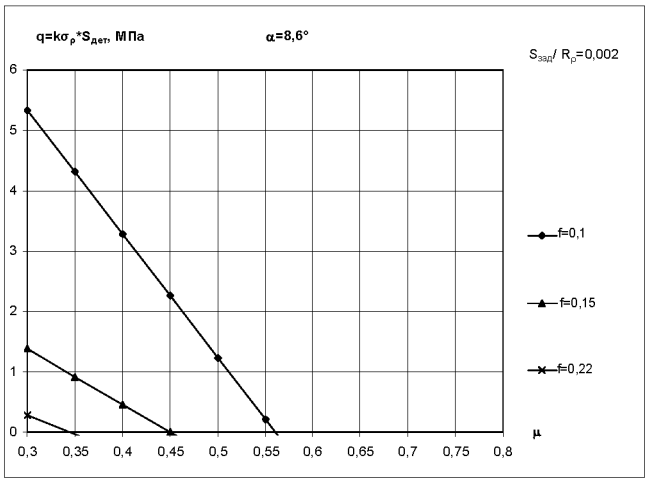

Рисунок 2.9 – Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 8{,}6°$ для выпуклой детали, полученной из алюминиевого сплава при $S_{заг} / D = 0{,}00345$

Расчеты проводились для заготовки из меди: высота детали $H = 25мм$, $R_{\rho} = 130{,}125мм$, $\alpha = 16{,}5°$. Результаты в виде графиков представлены на рисунке 2.10.

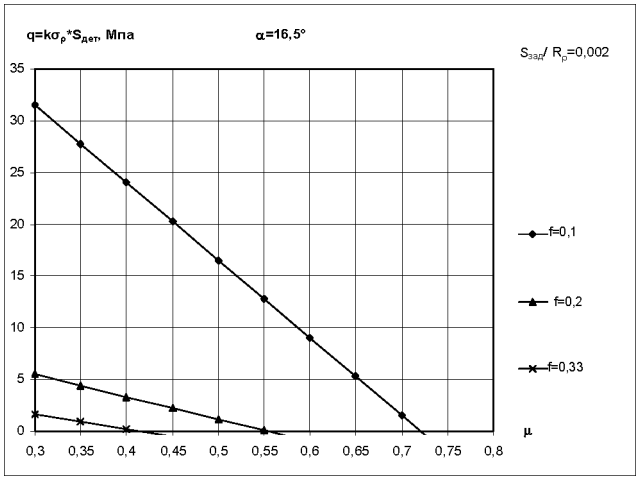

Рисунок 2.10 – Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле α=16,5° для выпуклой детали, полученной из меди при $S_{заг}/D=0{,}0029$

Расчеты проводились для заготовки из стали: высота детали $H=25мм$, $R_\rho=130{,}04мм$, $\alpha=17{,}5°$. Результаты в виде графиков представлены на рисунке 2.11.

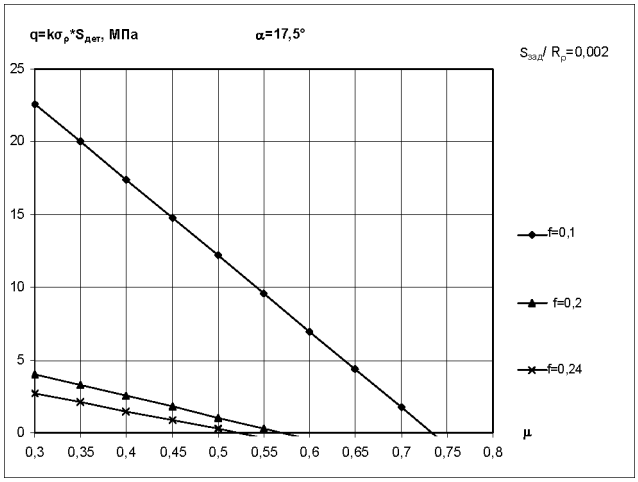

Рисунок 2.11 – Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле α=17,5° для выпуклой детали, полученной из стали при $S_{заг}/D=0{,}00095$

2.4.2 Формовка вогнутой детали

Для анализа, используя формулу (2.49), проведены расчеты для случая формовки вогнутой детали из уже рассмотренных выше заготовок (отношение $S_{заг}/D$ сохраняется), при таких же значениях коэффициентов трения, углах α. Результаты расчетов в виде графиков представлены на рисунках 2.12, 2.13, 2.14, 2.15.

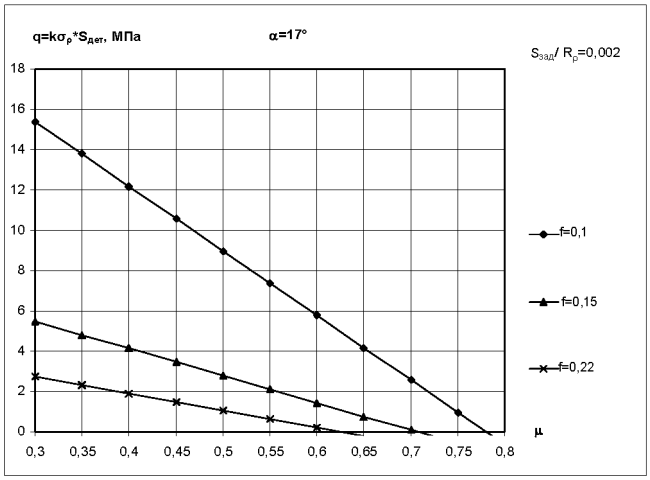

Рисунок 2.12 – Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле α =17° для вогнутой детали, полученной из алюминиевого сплава при $S_{заг}/D=0{,}00345$

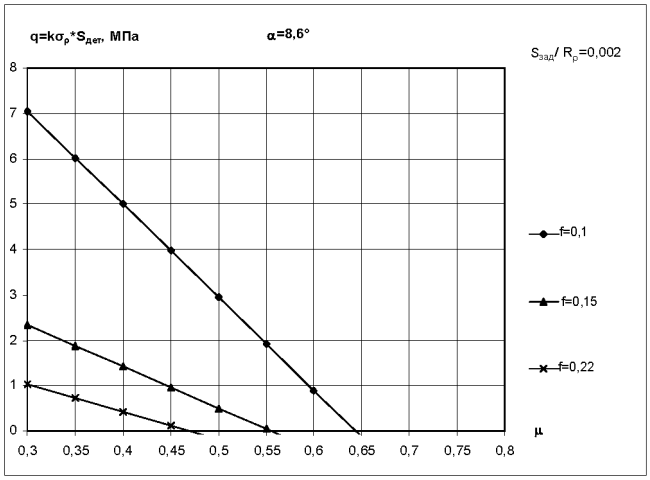

Рисунок 2.13 – Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле α =8,6° для вогнутой детали, полученной из алюминиевого сплава при $S_{заг}/D=0{,}00345$

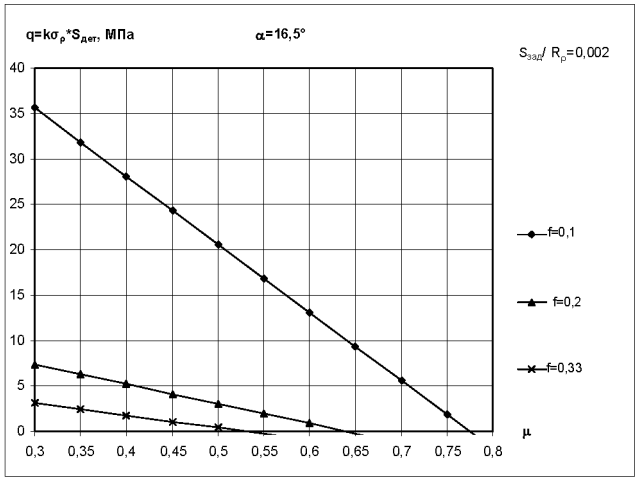

Рисунок 2.14 – Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле α =16,5° для вогнутой детали, полученной из меди при $S_{заг}/D=0{,}0029$

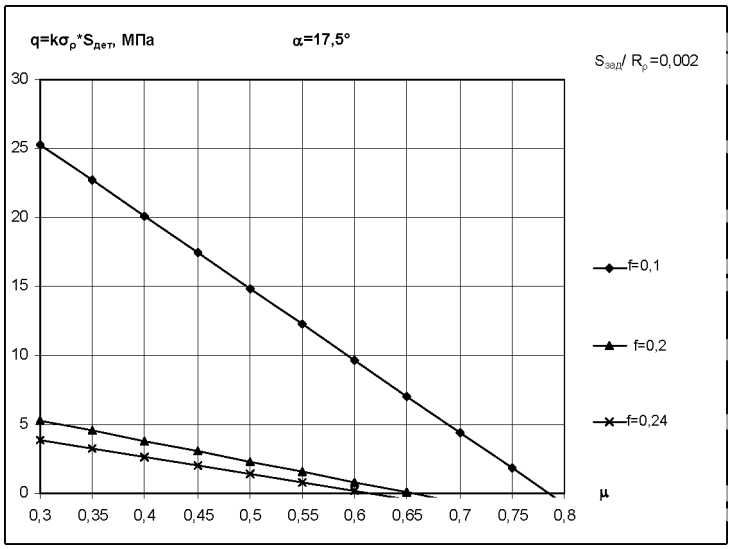

Рисунок 2.15 – Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле α =17,5° для вогнутой детали, полученной из стали при $S_{заг} / D = 0{,}00095$

Найденные значения давления дают возможность установить соотношения между полученной технологически возможной толщиной при расчете и толщиной заданной. Анализ показывает, что для всех рассмотренных выше материалов, значений угла α, коэффициента трения f, коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела μ это соотношение близко к единице. Результаты расчетов в виде графиков представлены на рисунках 2.16, 2.17.

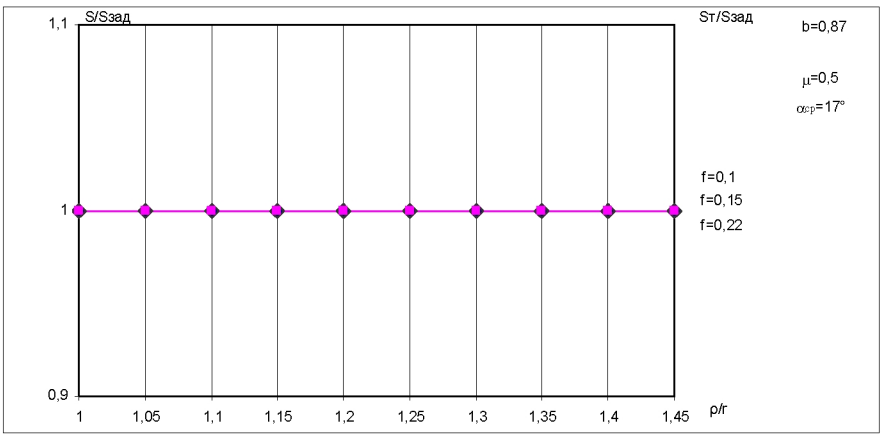

Рисунок 2.16 – Алюминиевый сплав, изменение $S_T / S_{зад}$ при увеличении отношения ρ / r, $\mu = 0{,}5$; α =17° для вогнутой детали

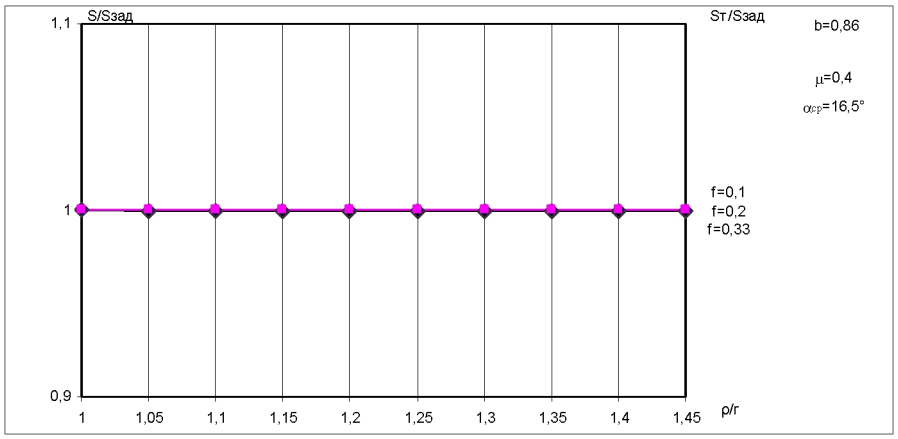

Рисунок 2.17 – Медь, изменение $S_T / S_{зад}$ при увеличении отношения ρ / r, $\mu = 0{,}4$; $\alpha = 16{,}5°$ для вогнутой детали

2.4.3 Формовка вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой детали

Согласно предложенной классификации (см. главу 1) формы деталей могут быть достаточно разнообразными, сложными (например, сочетая в себе два вида образующих), но предложенная методика расчета применима и для них. Рассмотрены некоторые частные случаи (см. рисунок 2.18).

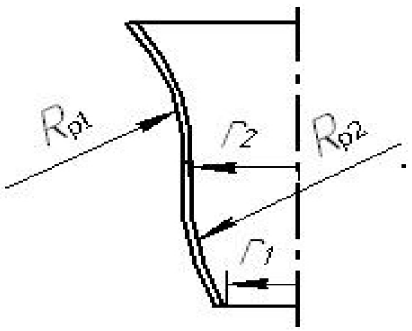

Рисунок 2.18 – Вогнуто-выпуклая деталь:
$R_{\rho 1}$ – радиус сопряжения вогнутой детали; $R_{\rho 2}$ – радиус сопряжения выпуклой детали;
r_1 – координата в зоне выпуклой детали; r_2 – координата в зоне вогнутой детали

Запишем уравнение (2.49) для двух зон детали:

$$k_1 = \frac{(1 - \mu - f\mu \cdot \mathrm{ctg}\alpha)\sin\alpha \pm r' f}{r' \cdot R_\rho} \cdot \frac{1}{f - f_1}, \qquad (2.66)$$

$$k_2 = \frac{(1 - \mu - f\mu \cdot \mathrm{ctg}\alpha)\sin\alpha \mp r' f}{r' \cdot R_\rho} \cdot \frac{1}{f - f_1}, \qquad (2.67)$$

где $r_1^{/} = \dfrac{r_1}{R_{\rho 1}}$;

$r_2^{/} = \dfrac{r_2}{R_{\rho 2}}$.

Так как давление одинаково для выпуклой и вогнутой частей детали, то и коэффициенты сжатия эластичного элемента также должны быть равны между собой: $k_1 = k_2$.

Приравняв формулы (2.66) и (2.67), определим, например значение коэффициента трения в случае $f_1 = 0$:

$$f = \frac{(1-\mu)\left(\sin\alpha_2 - \dfrac{r_2^{/}}{r_1^{/}}\sin\alpha_1\right)}{\mp r_2^{/} - \dfrac{r_2^{/}}{r_1^{/}}\mu\cos\alpha_1 + \mu\cos\alpha_2 \mp r_2^{/}}, \qquad (2.68)$$

где α_1 – угол, определяющий вогнутую деталь;

α_2 – угол, определяющий выпуклую деталь.

2.4.4 Формовка вогнуто-конической и выпукло-конической детали

Определим трение для вогнуто-конической и выпукло-конической детали для случая $f_1 \approx 0$ (см. рисунок 2.19).

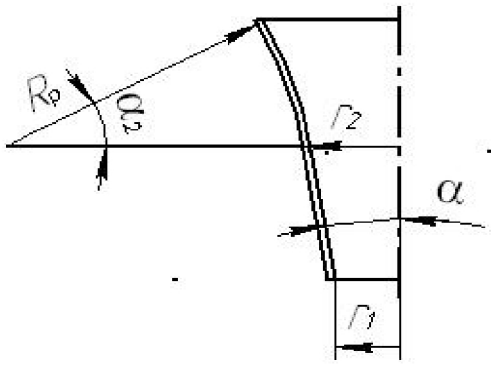

Рисунок 2.19 – Вогнуто-коническая деталь:
r_1 – координата в зоне конической детали; r_2 – координата в зоне вогнутой (выпуклой) детали; α – угол конусности детали; α_2 – угол, образованный радиусом R_ρ, проведенным к кромке вогнутой (выпуклой) детали и проведенным к точке перехода конической части в вогнутую (выпуклую) часть

Используем уже полученные ранее уравнения (2.49) и (2.50) для двух зон детали, приравняв их между собой, так как давление одинаково для вогнутой (выпуклой) и конической частей детали:

$$f = \frac{(1-\mu)(\sin\alpha_2 - r' \sin\alpha)}{\mu(\cos\alpha_2 - r' \cos\alpha) \mp r'}.$$

2.5 Теоретическая оценка применимости способа при отсутствии эластичного элемента

2.5.1 Формовка выпуклой детали

Для выпуклой детали давление, создаваемое эластичным элементом, отсутствует, если $k = 0$. Тогда из формулы (2.49) получим:

$$f \geq \frac{(1-\mu)\sin\alpha}{\mu\cos\alpha + r'}. \qquad (2.69)$$

В случае отсутствия эластичного элемента, т.е. давления, за параметр, обеспечивающий минимизацию функции, можно принять коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела или коэффициент трения. В листоштамповочном производстве удобнее таким параметром выбрать f. Проводим минимизацию функционала (2.45) для выпуклой детали по коэффициенту трения f, используя условие отсутствия давления, создаваемого эластичным элементом: равенство $k=0$, при этом обозначения A и $Б$ введены выше (см. формулы (2.39), (2.40)):

$$\frac{\partial}{\partial f}\int_0^x \left\{ S_{заг}\left(\frac{\sigma_{T_0}\sqrt{1-\mu^2}}{\Pi} + 1 - b - \frac{\sigma_\rho^*(1-\mu^2)}{\Pi}\left[\frac{1 + Б\left(k\left(1-\frac{f_1}{f}\right)\pm 1\right)x}{1+Ax} \right] \right) \right\}^2 dx = 0,$$

Установим значения коэффициента для получения детали с минимальной разнотолщинностью. После преобразований имеем:

$$f = \frac{(1-\mu)\left(\mu \cdot \mathrm{ctg}\alpha - \dfrac{r'}{\sin\alpha}\right)}{(\mu \cdot \mathrm{ctg}\alpha)^2 + \left(\dfrac{r'}{\sin\alpha}\right)^2}. \qquad (2.70)$$

Рассмотрим влияние угла на коэффициент трения при прочих равных условиях в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения коэффициента трения при $\mu = 0{,}5$ и различных значениях угла

$\alpha°$	17	12	8,6
f	0,23	0,16	0,11

С уменьшением угла коэффициент трения уменьшается и его значение таково, что достигается без применения эластичного элемента.

2.5.2 Формовка конической детали

Уравнение (2.50) имеет смысл, если:

$$1 - \mu = \mu \cdot f\mathrm{ctg}\alpha,$$

$$f \geq \frac{(1-\mu)}{\mu}\mathrm{tg}\alpha. \qquad (2.71)$$

Рассмотрим влияние угла на коэффициент трения при прочих равных условиях в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения коэффициента трения при $\mu = 0{,}5$ и различных значениях угла

$\alpha°$	17	12	8,6
f	0,31	0,21	0,15

С уменьшением угла коэффициент трения уменьшается.

3 Анализ процесса отбортовки плоской кольцевой заготовки в коническую деталь

Проанализируем возможности получения деталей способом отбортовки из кольцевой заготовки коническим пуансоном (см. рисунок 3.1).

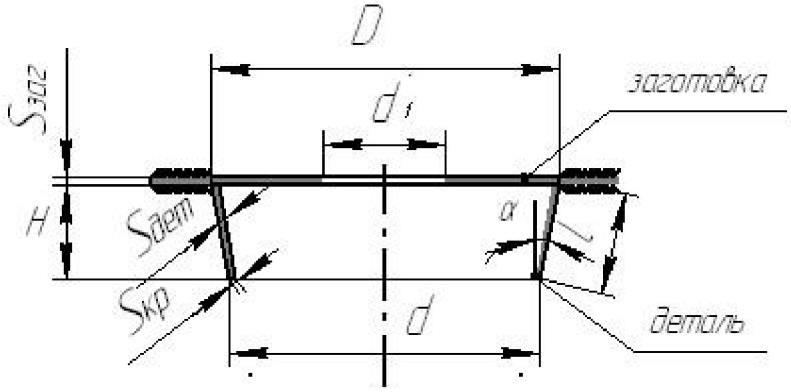

Рисунок 3.1 – Схема процесса отбортовки из кольцевой заготовки:
D – больший диаметр детали; d – меньший диаметр детали; d_1 – диаметр отверстия в заготовке; α – угол между осью и образующей полученной детали; H – высота детали; $S_{заг}$, $S_{дет}$ – толщина заготовки, толщина детали; l – длина образующей

3.1 Определение толщины детали

Проведем теоретический анализ для установления закона распределения толщины вдоль образующей детали. Используем метод последовательного приближения, суть которого состоит в нахождении закона изменения толщины между двумя приближенными функциями. Процесс поиска функции продолжается до тех пор, пока между двумя решениями, определяющими характер изменения толщины, приближение не достигнет заданной точности. Желательно, чтобы начиная с первого приближения принятый закон изменения толщин был наиболее близок к реальному. При этом обязательным является условие, при котором выбранная функция первого приближения удовлетворяет граничным условиям. Тогда толщина элементов детали, расположенных в зоне наибольшего диаметра, равна толщине заготовки, а толщина элементов на кромке меньшего диаметра определяется из условия линейного растяжения [80]:

$$S_{кр} = S_{заг}\sqrt{\frac{1}{k_{отб}}}, \tag{3.1}$$

где $k_{отб}$ – коэффициент отбортовки, равный $k_{отб} = \frac{d}{d_1}$.

В качестве первого приближения можно взять функцию распределения толщины:

$$S_1 = a + b\rho, \tag{3.2}$$

где a и b – const.

Используя условие колокации [44], определим коэффициенты a и b, считая $S = S_{кр} = S_{заг}\sqrt{\frac{1}{k_{отб}}}$ при $\rho = r_{кр}$; $S = S_{заг}$ при $\rho = R$:

$$a = S_{заг} + \left(\frac{S_{заг}\sqrt{\frac{1}{k_{отб}}} - S_{заг}}{R - r_{кр}}\right)R, \quad b = -\frac{S_{заг}\sqrt{\frac{1}{k_{отб}}} - S_{заг}}{R - r_{кр}}. \tag{3.3}$$

Значения толщины $S_{дет}$ во втором приближении найдем из уравнения связи напряжений и деформаций [80]:

$$S_{дет} = S_2 = S_{заг}\left(\frac{\rho}{r}\right)^{-\frac{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}+1}{2-\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}}}. \tag{3.4}$$

Связь между координатами r и ρ найдем из условия постоянства объема. Для части детали, ограниченной координатами R и ρ, имеем объем материала:

$$V'_{дет} = \frac{\pi\left(R^2 - \rho^2\right)}{\sin\alpha}S'_{ср}, \tag{3.5}$$

где $S'_{ср} = \frac{S_{заг} + a + b\rho}{2}$ – это средняя толщина части детали между координатами R и ρ. Для заготовки этот объем ограничен координатами R и r.

$$V'_{дет} = \pi\left(R^2 - r^2\right)S_{заг}. \tag{3.6}$$

Приравняв выражения (3.5) и (3.6), находим:

$$r = \sqrt{-\frac{S_{заг} + a + b\rho}{2S_{заг}} \cdot \frac{R^2 - \rho^2}{\sin\alpha} + R^2}\,. \qquad (3.7)$$

Для определения напряжений без учета упрочнения запишем уравнение равновесия с учетом изменения толщины [80]:

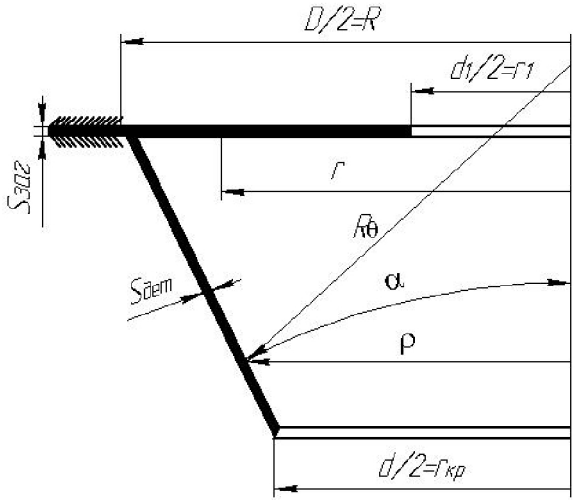

Рисунок 3.2 – Схема для определения соотношения координат элементов заготовки и детали

$$\rho\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho\left(1 + \frac{\rho dS_1}{S_{дет}d\rho}\right) - \sigma_\theta - \frac{f\rho}{\sin\alpha}\left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}\right) = 0, \qquad (3.8)$$

где f – коэффициент трения;

ρ – координата элемента на детали;

σ_ρ – напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ – напряжения в тангенциальном направлении;

R_ρ – радиус детали в меридиональном направлении;

R_θ – радиус детали в тангенциальном направлении;

α – угол между осью и образующей полученной детали;

$S_{дет}$ – толщина детали вдоль образующей.

Согласно рисунку 3.2:

$$\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} = \infty\,, \quad R_\theta = \frac{\rho}{\cos\alpha}\,.$$

С учетом принятых допущений и условия пластичности [80]:

$$\sigma_\theta = \sigma_S, \tag{3.9}$$

решение уравнения (3.8) приводится к виду:

$$\sigma_\rho = \sigma_S \left\{ \frac{a}{(a+b\rho)(1-f\operatorname{ctg}\alpha)} + \frac{b\rho}{(2-f\operatorname{ctg}\alpha)(a+b\rho)} - \left(\frac{r_{кр}}{\rho}\right)^{1-f\operatorname{ctg}\alpha} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{a+br_{кр}}{(a+b\rho)}\right)\left(\frac{a}{(1-f\operatorname{ctg}\alpha)(a+br_{кр})} + \frac{br_{кр}}{(2-f\operatorname{ctg}\alpha)(a+br_{кр})}\right)\right\}. \tag{3.10}$$

3.2 Определение относительной высоты детали

Сравним полученные значения толщин в $1^{-м}$ и $2^{-м}$ приближениях (формулы (3.2), (3.4)), построив графики для разных коэффициентов трения (от 0,1 до 0,25), что позволит оценить характер изменения исходного параметра (рисунок 3.3). Исходными данными являются параметры момента образования трещины: $k_{отб}$; D; α. Угол конусности детали найдем из условия постоянства объема металла заготовки и детали:

$$V_{дет} = V_{заг},$$

$$F_{дет} S_{ср} = F_{заг} S_{заг}, \tag{3.11}$$

где $V_{заг}$, $V_{дет}$ – объем заготовки, объем детали;

$F_{заг}$, $F_{дет}$ – площадь заготовки, площадь детали;

$S_{ср}$ – средняя толщина детали, равная: $S_{ср} = \dfrac{S_{заг} + S_{кр}}{2}$.

Используем, кроме этого, геометрические соотношения (см. рисунок 3.1):

$$F_{дет} = \pi \cdot \frac{D+d}{2} \cdot l,\ l = \frac{D-d}{2\sin\alpha},\ F_{заг} = \frac{\pi\left(D^2 - d_1^2\right)}{4}. \tag{3.12}$$

Тогда

$$\sin\alpha = \frac{\left[\left(\dfrac{D}{d_1}\right)^2 - \left(\dfrac{S_{заг}}{S_{кр}}\right)^4\right]\left(1 + \dfrac{S_{кр}}{S_{заг}}\right)}{2\left[\left(\dfrac{D}{d_1}\right)^2 - 1\right]}. \tag{3.13}$$

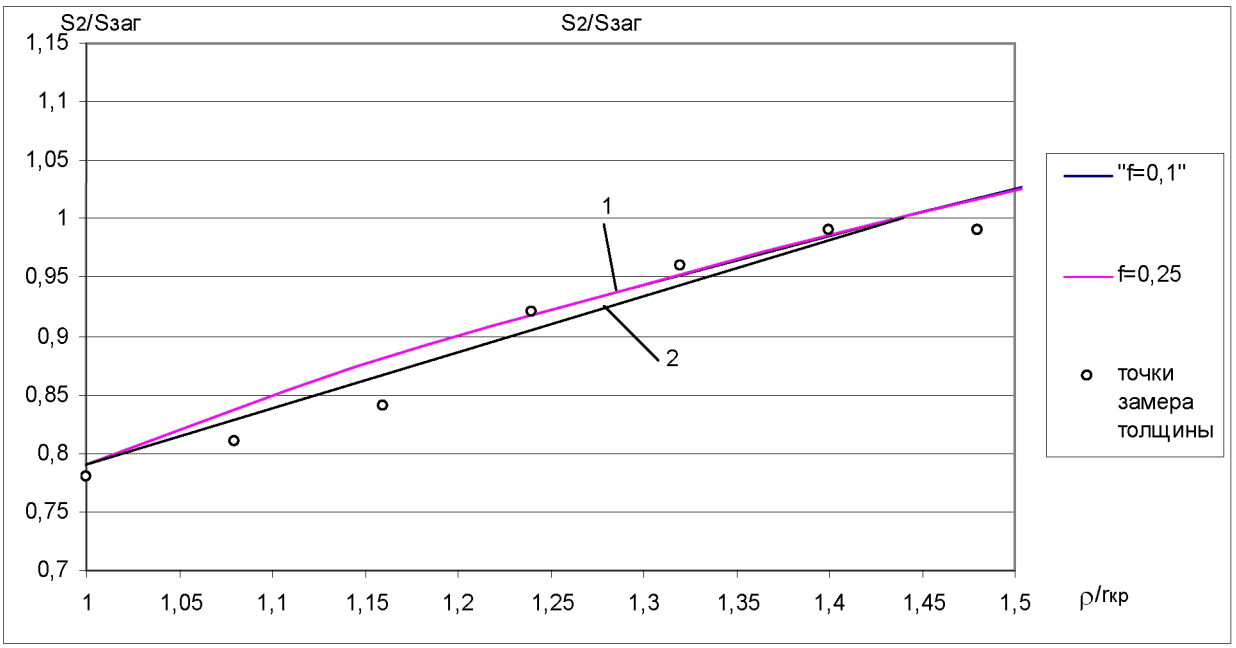

Рисунок 3.3 – График зависимости $\frac{S_2}{S_{заг}}$ от $\frac{\rho}{r}$

($k_{отб} = 1{,}6$; $D = 115 мм$; $S_{заг} / S_{кр} = 1{,}28$; $\alpha = 34{,}7^{\circ}$):

1 – расчетная кривая; 2 – априорная кривая

Полученные зависимости позволяют установить, что без большой погрешности характер толщины детали после отбортовки можно считать линейным с принятыми граничными условиями. Трение практически не оказывает влияния на процесс.

Применив условие постоянства объема (3.11), геометрические соотношения:

$$F_{дет} = \pi \cdot \frac{D+d}{2} \cdot l,\ l = \frac{H}{\cos\alpha},\ F_{заг} = \frac{\pi\left(D^2 - d_1^2\right)}{4},$$

определим относительную высоту:

$$\frac{H}{D} = \frac{\left[\left(\frac{D}{d_1}\right)^2 - 1\right]\cos\{\arcsin\alpha\}}{\left[\frac{D}{d_1} + \left(\frac{S_{заг}}{S_{кр}}\right)^2\right]\left(1 + \frac{S_{кр}}{S_{заг}}\right)\frac{D}{d_1}}. \qquad (3.14)$$

Для нахождения предельного коэффициента отбортовки считаем, что величина относительного сужения выражается через площадь кромки и площадь заготовки:

$$\psi = e_{кр} = \frac{-F_0 + F}{F_0} = \frac{-\pi d_1 S_{заг} + \pi d S_{кр}}{\pi d_1 S_{заг}}. \qquad (3.15)$$

Учитывая соотношения (3.1) и (3.15), имеем:

$$\psi = \sqrt{\frac{d}{d_1}} - 1 = \sqrt{k_{отб}} - 1. \qquad (3.16)$$

Полученная зависимость позволяет найти предельный коэффициент отбортовки при условии $\psi = \psi_ш$:

$$k_{пред} \le \frac{d}{d_1} = (\psi_ш + 1)^2.$$

На рисунке 3.4 представлена графическая зависимость H/D от $S_{заг}/S_{кр}$ для конкретного материала М3 при формообразовании за несколько операций с учетом механических свойств: $\delta_ш = 0{,}325$, $\psi_ш = 0{,}245$, $k_{пред} = 1{,}55$.

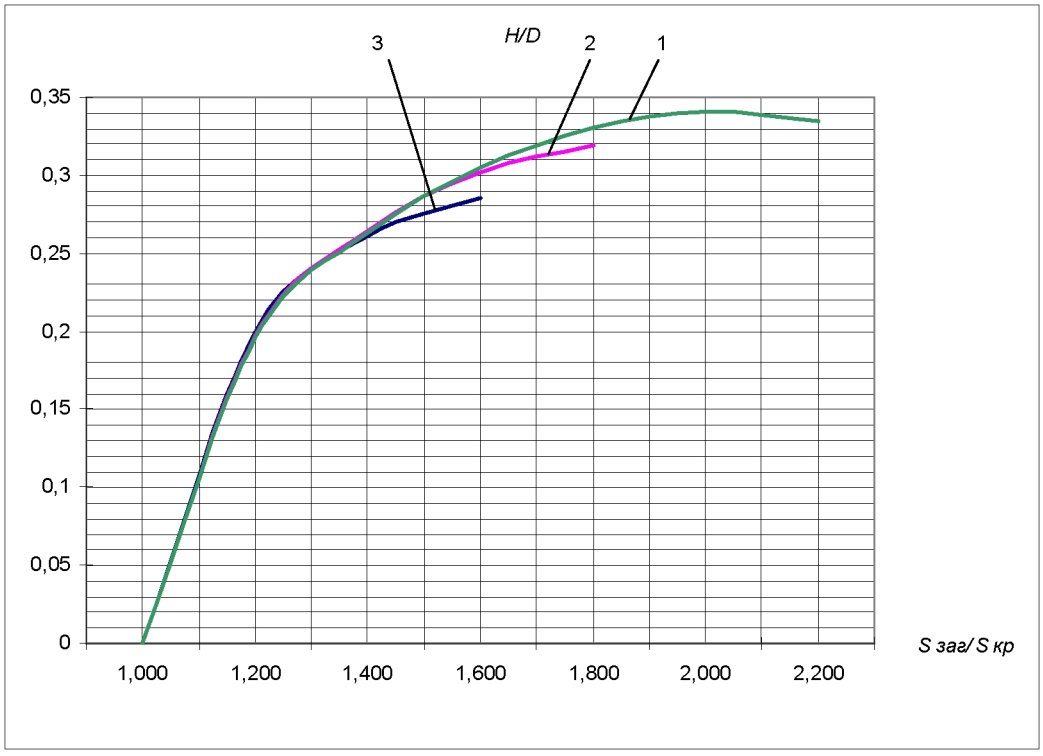

Рисунок 3.4 - График зависимости $\frac{H}{D}$ от $\frac{S_{заг}}{S_{кр}}$:

1 – кривая при $\frac{D}{d_1} = 5$ (4 операции); 2 – кривая при $\frac{D}{d_1} = 4$ (3 операции);

3 – кривая при $\frac{D}{d_1} = 3$ (2 операции)

Построенные графики позволяют оценить возможность получения тонкостенных оболочек способом отбортовки при многократных операциях: когда отношение большего диаметра детали к диаметру отверстия заготовки $\frac{D}{d_1} > 5$ и угол конусности $\alpha \approx 17^\circ$, относительная высота $\frac{H}{D}$ имеет экстремум равный 0,34. Это говорит о том, что получить большее значение относительной высоты в реальных процессах вряд ли возможно. Наличие максимума объясняется тем, что с уменьшением угла конусности, с одной стороны, высота должна увеличиваться, но, с другой стороны, за счет сокращения длины образующей отбортованного участка его высота уменьшается.

Предложенный способ, основанный на процессе отбортовки, позволяет получать тонкостенные осесимметричные оболочки усеченной конической формы без сварного шва при относительной высоте H/D не более 0,34 и существенной разнице толщин между кромкой малого и большого диаметров.

4 Анализ способа, совмещающего процессы формовки и вытяжки

Ранее проведённый анализ показал, что особо тонкостенные конические детали, для которых при формообразовании требуется условие плоского напряжённого состояния растяжения, соответствующего процессу формовки, могут быть получены с относительной высотой (H/D) не более 0,33, даже для высокопластичных материалов.

Увеличить относительную высоту детали можно, если в очаг деформации процесса формовки донного и конического участков обеспечить дополнительный материал со стороны сильно прижатого фланца.

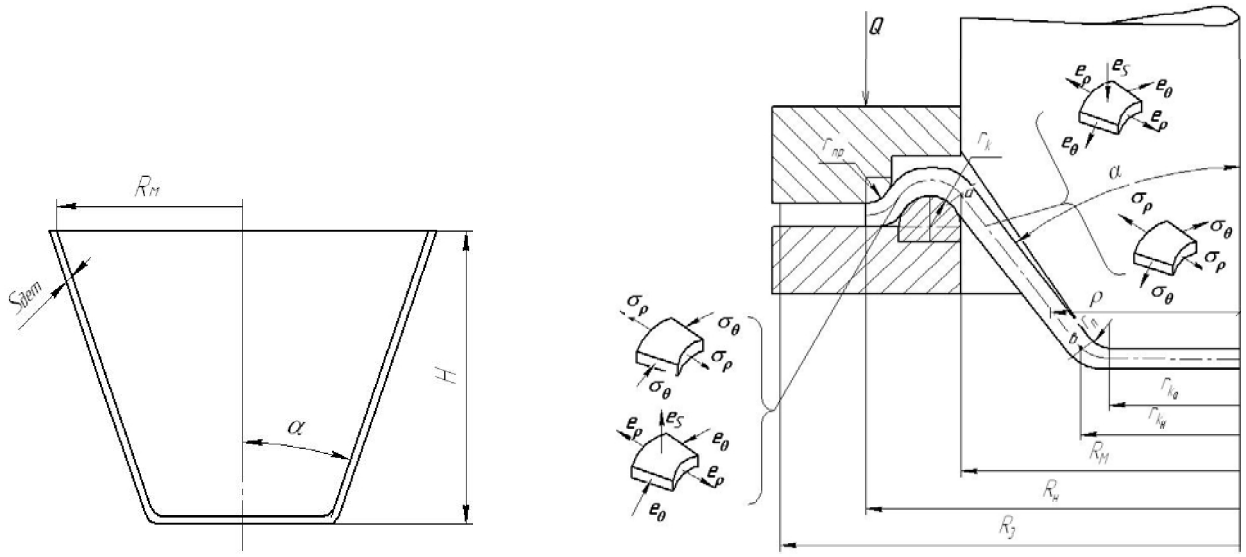

Рисунок 4.1 - Схема формовки – вытяжки

Условие, обеспечивающее формовку и устранение гофр на коническом свободном участке, имеет место, если в точке «а» (в зоне касания заготовки) тангенциальное напряжение $\sigma_\theta = 0$ меняет знак сжатия при вытяжке на знак растяжения при формовке. Это возможно, если при небольших размерах фланца использовать перетяжные пороги.

4.1 Определение напряжений при вытяжке, обеспечивающих процесс формовки на коническом участке

Найдём напряжение от вытяжки в соответствии с методикой [80,25]:

$$\sigma_{\rho_a} = \beta\left(\sigma_{T_0} + \Pi X\right)\left\{\left[\ln\left|K_в\right| - X + \frac{1}{2\bar{r}_{пр}+1} + \frac{Q\cdot f}{\pi S_{заг} R_з}\right]e^{0{,}5 f\pi} + \frac{1}{2\bar{r}_к + 1}\right\}e^{f\pi}, \qquad (4.1)$$

где $\beta = 0{,}5\left(\frac{1}{\sqrt{1-\mu_{31}\cdot\mu_{13}}} + \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}} - 2\mu_{31} + 1}}\right)$ – приведённый коэффициент Лоде;

σ_{T_0}, Π – показатели упрочнения линейной функции;

$K_в = \ln\left|\frac{R_з}{R_м}\right|$ – коэффициент вытяжки;

$R_м$ – радиус отверстия в матрице;

$\bar{r}_{пр} = \dfrac{r_{пр}}{S_{заг}}$ – относительный радиус скругления на кольце;

$\bar{r}_к = \dfrac{r_к}{S_{заг}}$ – относительный радиус перетяжного порога;

f – коэффициент трения;

Q – усилие прижима;

$R_з$ – радиус заготовки (принято условие, что от трения под прижимом дополнительное напряжение постоянно);

$S_{заг}$ – толщина заготовки;

$X = \dfrac{R_з - R_н}{R_з}$ – относительное перемещение кромки;

$R_н$ – радиус кромки заготовки на заключительной стадии.

Для трансверсальной анизотропии приведённый коэффициент Лоде найдём из условия:

$$\mu_{12} = \mu_{21} = \mu; \quad \mu_{31} = 1 - \mu; \quad \mu_{13} = 0{,}5;$$

$$\beta = 0{,}5\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1+\mu}} + \frac{\sqrt{1-\mu}}{\sqrt{1+3\mu+2\mu^2}}\right), \tag{4.2}$$

где μ – коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

Анализ выражения (4.1) показывает, что оно имеет экстремум от переменной, которой является относительное перемещение X. С ростом X увеличивается напряжение от упрочнения $\left(\sigma_{T_0} + ПX\right)$, но одновременно уменьшаются относительные размеры фланца X.

Разделим левую и правую части на $П$ и возьмём производную по X. Учтём, что β и $e^{f(\pi-\alpha)}$ не влияют на экстремум.

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{\rho_a}}{\partial X} = \left[\ln\left|K_в\right| - X + \frac{1}{2\bar{r}_{пр}+1} + \frac{Q \cdot f}{\pi S_{заг} R_з}\right] e^{0{,}5f\pi} + \frac{1}{2\bar{r}_к + 1} - \left(\bar{\sigma}_{T_0} + X\right) e^{0{,}5f\alpha} = 0, \tag{4.3}$$

где $\bar{\sigma}_{\rho_a} = \dfrac{\sigma_{\rho_a}}{П}$; $\bar{\sigma}_{T_0} = \dfrac{\sigma_T}{П}$. Представим (4.3) в виде:

$$-Xe^{0,5f\pi}+\underbrace{\left[\ln\left|K_в\right|-X+\frac{1}{2\bar{r}_{пр}+1}+\frac{Q\cdot f}{\pi S_{заг}R_з}\right]e^{0,5f\pi}+\frac{1}{2\bar{r}_к+1}-\bar{\sigma}_{T_0}e^{0,5f\pi}}_{a}-Xe^{0,5f\pi}=0. \qquad (4.4)$$

Для выполнения равенства в точке «а» $\sigma_\theta=0$ используем условие пластичности $\sigma_{\rho_a}-\sigma_{\theta_a}=\sigma_{S_a}$. Выражение (4.1) приравниваем пределу текучести:

$$\sigma_{\rho_a}=\sigma_{S_a}=\beta\left(\sigma_{T_0}+\Pi\bar{X}\right). \qquad (4.5)$$

Из выражения (4.1) получим:

$$\frac{Q\cdot f}{\pi S_{заг}R_з}=\left(e^{-f(\pi-\alpha)}-\frac{1}{2\bar{r}_к+1}\right)e^{-0,5f\pi}-\ln\left|K_в\right|+\bar{X}-\frac{1}{2\bar{r}_{пр}+1}. \qquad (4.6)$$

Подставим (4.6) в (4.4) и после преобразований имеем:

$$e^{-f(\pi-\alpha)}-\bar{\sigma}_{T_0}e^{0,5f\pi\alpha}-\bar{X}e^{0,5f\pi}=0.$$

Далее определим перемещение «а»:

$$\bar{X}=-\bar{\sigma}_{T_0}+\exp\left[f\left(\alpha-1{,}5\pi\right)\right]. \qquad (4.7)$$

Приняв $r_к=r_{пр}$:

$$R_н=R_м+2r_к+r_{пр}=R_м+3r_{пр}. \qquad (4.8)$$

Из выражений (4.7), (4.8) находим радиус заготовки:

$$R_з=\frac{R_н}{1-\bar{X}}=\frac{R_м+3r_{пр}}{1-\bar{X}}. \qquad (4.9)$$

4.2 Определение предельных параметров процесса формовки, совмещённой с вытяжкой

Полученное значение радиуса заготовки $R_з$ является максимальным и объём, ограниченный им и радиусом $R_н$, может быть использован для формирования конической детали по максимуму при условии, что коническая часть заготовки деформируется в условии плоского напряженного состояния растяжения, соответствующего процессу формовки.

Необходимо иметь в виду, что выражение (4.5) не должно превышать некоторого значения предела текучести в точке «а», во избежание обрыва в

донной части заготовки при формовке. Для этого рассмотрим процесс формовки. Уравнение равновесия в постоянной системе координат запишем:

$$\overline{\rho}\frac{d\sigma_\rho}{d\overline{\rho}}+\sigma_\rho-\sigma_\theta=0, \tag{4.10}$$

где $\overline{\rho}=\frac{\rho}{R_м}$.

Энергетическое условие пластичности для трансверсально-анизотропного тела:

$$\sigma_S^2=\sigma_\rho^2-2\mu\sigma_\rho\sigma_\theta+\sigma_\theta^2. \tag{4.11}$$

Отсюда:

$$\sigma_\theta=\mu\sigma_\rho+\sqrt{\sigma_S^2-(1-\mu^2)\sigma_\rho^2}. \tag{4.12}$$

Ищем решение уравнения (4.10) в виде ряда Тейлора в точке «а»:

$$\sigma_\rho=\sigma_{\rho_a}+\sigma'_{\rho a}(\overline{\rho}-1)+\frac{1}{2}\sigma''_{\rho a}(\overline{\rho}-1)^2, \tag{4.13}$$

при $r_{кн}\le\overline{\rho}\le1$, $\overline{\rho}=\frac{\rho}{R_м}$; $\sigma_{\rho_a}=\sigma_{S_a}$; $\sigma_{\theta_a}=0$. Коэффициент $\sigma'_{\rho a}$ находим из (4.10) при $\overline{\rho}=\frac{\rho}{R_м}=1$:

$$\sigma'_{\rho a}=\frac{d\sigma_\rho}{d\rho}=\frac{\sigma_{\theta_a}-\sigma_{\rho_a}}{\overline{\rho}}=-\sigma_{S_a}.$$

Решение (4.13) примет вид с двумя членами ряда:

$$\sigma_\rho=\sigma_{S_a}-\sigma_{S_a}(\overline{\rho}-1),$$

Решение (4.13) примет вид с тремя членами ряда:

$$\sigma_\rho=\sigma_{S_a}-\sigma_{S_a}(\overline{\rho}-1)-\frac{1}{2}\sigma_{S_a}(\overline{\rho}-1)^2=\sigma_{S_a}\left[2-\overline{\rho}-0{,}5(\overline{\rho}-1)^2\right]. \tag{4.14}$$

Даже при $\overline{\rho}=0{,}5$ доля третьего слагаемого составит 0,125, что соответствует менее 8% от общей суммы слагаемых (4.14).

Если принять, что в радиусной части пуансона при формовке:

$e_S=e_i=\delta_p$, то $\sigma_\rho=\sigma_S=\sigma_{T_0}+Пe_S=\sigma_{T_0}+П\delta_p$. (4.15)

Приравняв (4.14) и (4.15), получим:

$$\sigma_{T_0}+П\delta_p=\sigma_{S_a}\left[2-\overline{r_{кн}}-0{,}5(\overline{r_{кн}}-1)^2\right], \tag{4.16}$$

где $\overline{r_{kн}} = \dfrac{r_{kн}}{R_м}$.

Отсюда:

$$\sigma_{\rho_a} = \sigma_{S_a} = \frac{\sigma_{T_0} + П\delta_p}{2 - \overline{r_{kн}} - 0{,}5(\overline{r_{kн}} - 1)^2}. \qquad (4.17)$$

Последнее выражение позволяет найти относительное смещение кромки $\overline{X}$ по формуле (4.5) из условия обрыва дна заготовки при максимальных меридиональных напряжениях в точке «а» и значении кромки $\rho = R_н$. Если окажется, что из условия обрыва дна относительное смещение больше, чем из условия, связанного с процессом вытяжки, то необходимо выбрать последнее $\overline{X}$ и считать по формуле (4.7). В противном случае останавливаемся на расчетах по формуле (4.5).

Определим высоту детали из условия постоянства объёма:

$$V_{дет} = V_ф + V_в. \qquad (4.18)$$

где $V_{дет}$, $V_ф$, $V_в$ – соответственно объёмы детали, формованной части и части, полученной от вытяжки.

Приняв толщину постоянной равной толщине детали найдём:

$$V_{дет} = \pi\left(\frac{r_{к_0} + r_к}{2}\right)^2 S_{дет} + \pi\frac{R_м^2 - \left(\dfrac{r_{к_0} + r_к}{2}\right)^2}{2\sin\alpha} S_{дет}, \qquad (4.19)$$

где $r_{к_0}$, $r_к$ – радиусы донной части детали.

$$S_{дет} = S_{заг}(1 - \delta_p). \qquad (4.20)$$

Объём детали от процесса формовки равен:

$$V_ф = \pi R_м^2 S_{заг}. \qquad (4.21)$$

Объём детали от процесса вытяжки:

$$V_в = \pi\left(R_з^2 - R_м^2\right)S_{заг}. \qquad (4.22)$$

Из выражений (4.18) – (4.23) имеем:

$$\alpha = \arcsin\left\{\frac{0{,}5\left[R_м^2 - 0{,}25\left(r_{к_0} + r_{к_н}\right)^2\right]S_{дет}}{\left(R_н^2 + R_з^2 - R_м^2\right)S_{заг} - 0{,}25 S_{дет}\left(r_{к_0} + r_{к_н}\right)^2}\right\}, \qquad (4.23)$$

где $r_{к_н} = r_{к_0} + r_{пр}$.

Высота детали равна:

$$H = \frac{R_м - r_{ср}}{\operatorname{tg}\alpha}, \qquad (4.24)$$

где $r_{ср} = \frac{(r_{к_н} + r_{к_0})}{2}$.

Вывод: разработанная методика показала, что в очаг деформации при формовке тонкостенных конических оболочек можно доставить дополнительный объём за счёт процесса вытяжки, создав условия для увеличения глубины детали.

Предложенный процесс из-за больших напряжений со стороны прижима для устранения гофрообразования на свободном коническом участке имеет большие ограничения, чем при вытяжке цилиндрических деталей.

Пример: Определить высоту конической оболочки (см. рисунок 4.1).

$R_м = 100мм$; $r_{к_0} = 70мм$; $S_{дет} = 0{,}5мм$; $r_к = 1{,}5мм$; $r_н = 2{,}5мм$; $f = 0{,}15мм$.

Материал Х18Н10Т; $\delta_р = 0{,}45$; $\sigma_в = 65кг/мм^2$.

Определить толщину заготовки $S_{заг}$, $R_{заг}$; размеры кольца (4.4) $r_{пр} = r_к$, $R_н$.

1. Определим константы прямой упрочнения [80]:

$$\sigma_S = \sigma_{T_0} + П\psi;\ \psi_0 = \frac{\delta}{1+\delta} = \frac{0{,}45}{1{,}45} = 0{,}3;\ \sigma_{T_0} = \frac{\sigma_в(1-2\psi)}{(1-2\psi_0)^2} = \frac{65(1-0{,}31\cdot 2)}{(1+0{,}31)^2} = 52{,}5кг/мм^2;$$

$$П = \frac{65}{0{,}47} = 138{,}3кг/мм^2$$

2. Зададимся $r_к = 3S = 1{,}5мм$.

3. Определим относительное смещение кромки:

$$\overline{X} = \frac{1}{e^{f(1{,}5\pi-\alpha)}} - \sigma_{T_0} = \frac{1}{e^{0{,}15\cdot 4{,}75}} - \frac{52{,}5}{138{,}3} = \frac{1}{1{,}94} - 0{,}37 = 0{,}145мм.$$

4. Определим радиус заготовки:

$$R_{заг} = \frac{100 + 3{,}15}{1 - 0{,}145} = 122мм.$$

5. Определим в точке «а» предельно допустимое напряжение:

$$\sigma_\rho = \sigma_{S_a} = \frac{\overline{\sigma}_{T_0} + П\delta_p}{2 - \overline{\rho} - 0{,}5(\overline{\rho} - 1)^2} = \frac{52{,}5 + 138{,}3 \cdot 0{,}45}{2 - 0{,}7 - 0{,}5 \cdot 0{,}09} = \frac{114{,}7}{1{,}255} = 91{,}3 кг / мм^2 .$$

6. Определим максимально возможное смещение по формуле (4.5):

$$\overline{X}_m = \left(\frac{\sigma_{S_a}}{П} - \frac{\sigma_{T_0}}{П} \right) = \frac{91{,}3}{138{,}3} - \frac{52{,}5}{138{,}3} = 0{,}28 мм .$$

Принимаем смещение кромки $\overline{X} = 0{,}145 мм$.

$$\alpha = \arcsin\left\{ \frac{0{,}5\left[100^2 - 0{,}25 \cdot 72{,}5^2\right] 0{,}5 \cdot 0{,}55}{\left(122^2 + 100^2 - 104{,}5^2\right) 0{,}5 - 0{,}25 \cdot 0{,}26 \cdot 71{,}5^2} \right\} = \frac{1194}{6981{,}8 - 332} = \frac{1194}{6649} = 0{,}18 ; \ \alpha = 11^\circ .$$

7. Определим высоту детали:

$$H = \frac{R_м - \frac{r_{к_0} + r_{к_н}}{2}}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{100 - 71}{0{,}19} = 145 \ мм .$$

8. Определим усилие прижима:

$$Q = \frac{2\pi R_з S_{заг}}{f} \left[\left(e^{-f(\pi - \alpha)} - \frac{1}{2\overline{r}_к + 1} \right) e^{-0{,}5\pi f} - \ln\left|K_в\right| + \overline{X} - \frac{1}{2\overline{r}_{пр} + 1} \right] =$$

$$= \frac{2\pi \cdot 122 \cdot 0{,}5}{0{,}15} \left[0{,}5 - 0{,}12 - 0{,}2 - 0{,}14 + 0{,}145 \right] = 715 кг .$$

5 Анализ способа, совмещающего последовательно процессы формовки и отбортовки

5.1 Механизм способа формовки и отбортовки

Проанализируем совмещенный способ формовки и последующей отбортовки, выявим его возможности. Сущность способа состоит в следующем. Заготовка жестко закрепляется по кромке между матрицей и прижимом. Процесс формовки осуществляется наружным пуансоном 2, которому усилие передается через эластичную среду 3 внутренним пуансоном 1 (см. рисунок 5.1). Процесс заканчивается, когда пуансон прижмет периферийную часть заготовки к матрице.

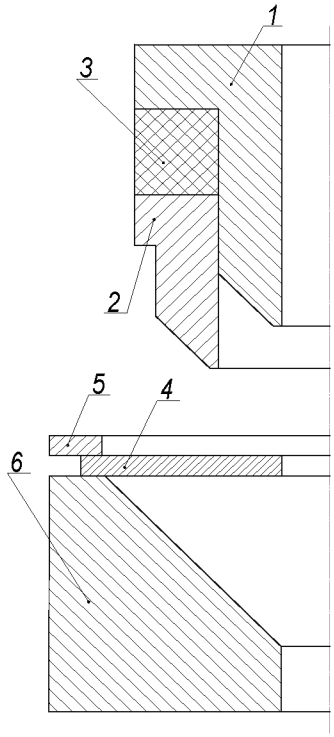

Рисунок 5.1 – Устройство для формообразования кольцевой тонкостенной заготовки: 1 – внутренний пуансон; 2 – наружный пуансон; 3 – эластичный буфер; 4 –заготовка; 5 – прижим; 6 – матрица

С ростом усилия и преодоления сопротивления эластичного буфера 3 начинается процесс отбортовки внутренних элементов кольцевой заготовки. Для реализации этого способа необходимо установить границы перехода процесса формовки в отбортовку и наоборот. Процесс формовки происходит в том случае, когда напряжения отбортовки больше или равны напряжению формовки в зоне перехода отформованного конического участка в плоскую донную часть. Известно, что напряжения при отбортовке вычисляются по формуле (5.1) [70]:

$$\sigma_{\rho}^{отб} = \sigma_S \left(1 - \frac{r_{кр}}{R_б} \right). \qquad (5.1)$$

В представленном выражении напряжение текучести учитывает упрочнение при условии, что все элементы в донной части заготовки, которые отбортовываются, получили одинаковую величину интенсивности деформаций.

Чтобы обеспечить последовательность процессов формовки и отбортовки за один переход, необходимо установить геометрические

параметры заготовки после формовки $\frac{r_0}{R_б}$, угол охвата заготовкой радиуса пуансона θ при заданной геометрии детали $\frac{r}{R}$.

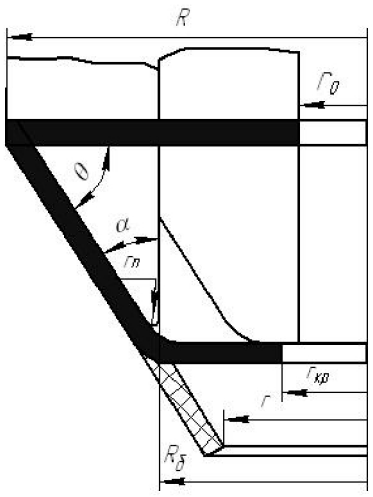

Рисунок 5.2 – Схема процесса формовки и отбортовки:
R – радиус большего основания детали; r – радиус меньшего основания детали, полученной формовкой; $R_б$ – радиус цилиндрической поверхности на границе наружного и внутреннего пуансонов; $r_{кр}$ – радиус кромки; $r_п$ – радиус закругления пуансона; r_0 – радиус отверстия в заготовке; θ – угол охвата заготовкой радиуса пуансона; α – угол конусности

5.2 Теоретический анализ способа последовательного совмещения процессов формовки-отбортовки

Для решения поставленной задачи выполним условия:

1. На 1-й стадии при формовке желательно выдержать соотношение $\frac{r_{кр} - r_0}{r_0} \le \varepsilon$, где ε – деформация кромки на 1-й стадии ($\varepsilon \le 0{,}002$).

2. На 2-й стадии при отбортовке считать условием предельного деформирования выражение [70]:

$$e_{\theta кр} = \frac{r - r_0}{r_0} \le \delta_p, \qquad (5.2)$$

где $e_{\theta кр}$ – тангенциальная деформация кромки;

δ_p – равномерное удлинение.

Из последнего выражения находим радиус отверстия:

$$r_0 = \frac{r}{\delta_p + 1}. \tag{5.3}$$

В формуле (5.1) будем считать: $\sigma_S = \sigma_{To} + П e_\theta$,

$$r_{кр} \approx r_0, \tag{5.4}$$

где $П$ – модуль упрочнения, равный:

$$П = \frac{\sigma_{To}}{1 - \delta_p}; \tag{5.5}$$

σ_{To} – экстраполированный предел текучести.

С учетом (5.4), (5.5) из выражения (5.1) получим:

$$\sigma_\rho^{отб} = \sigma_{To}\left(1 + \frac{\varepsilon}{1 - \delta_p}\right)\left(1 - \frac{r_{кр}}{R_б}\right). \tag{5.6}$$

В данной формуле неизвестным является $\sigma_\rho^{отб}$, остальные параметры берутся либо конструктивно, либо из параметров механических свойств. Процесс формовки заканчивается и начинается отбортовка, когда выполняется условие $\sigma_\rho^{отб} = \overline{\sigma}_\rho^{форм}$,

где $\overline{\sigma}_\rho^{форм}$ – напряжения от формовки в зоне отбортовки с учетом изгиба и трения по радиусу пуансона.

В момент окончания формовки и начала активной отбортовки:

$$\sigma_\rho^{форм} = \sigma_{To} + П\left(\frac{S_{заг} - S_{дет}}{S_{заг}}\right), \tag{5.7}$$

где $S_{дет}$ – известное значение толщины;

$S_{заг}$ – толщина заготовки.

С учетом изгиба и трения формула (5.7) примет вид:

$$\overline{\sigma}_\rho^{форм} = \left\{\left[\sigma_{To} + П\left(\frac{S_{заг} - S_{дет}}{S_{заг}}\right)\right] - \frac{\sigma_{To} + П\left(\frac{S_{заг} - S_{дет}}{S_{заг}}\right)}{\frac{2r_n}{S_{заг}} + 1}\right\} / \left(1 + f \cdot \theta\right). \tag{5.8}$$

Отношение $\frac{S_{дет}}{S_{заг}}$ находим, считая, что толщина заготовки после формовки равна толщине из условия предельной деформации кромки, а также толщине

детали. Так как напряженно-деформируемое состояние на кромке линейное, то из условия постоянства объема для изотропного материала:

$$e_\rho + e_S + e_\theta = 0, e_S = -\frac{1}{2}e_\theta = -\frac{1}{2}\delta_p \text{ или } e_S = \frac{S_{дет} - S_{заг}}{S_{заг}} = -\frac{1}{2}\delta_p,$$

$$\frac{S_{дет}}{S_{заг}} = 1 - 0{,}5\delta_\rho . \tag{5.9}$$

Формула (5.7) запишется в виде:

$$\sigma_\rho^{отб} = \sigma_\rho^{форм} = \sigma_{To} + 0{,}5П\delta_p = \sigma_{To} + 0{,}5\delta_p \frac{\sigma_{To}}{1-\delta_p}. \tag{5.10}$$

Приравняв (5.6) и (5.8), с учетом (5.9) после преобразования получим:

$$\frac{r_0}{R_б} = \frac{1}{1+\varepsilon} - \frac{2\left(1-0{,}5\delta_\rho\right)\frac{r_n}{S_{заг}}}{\left(\frac{2r_n}{S_{заг}}+1\right)(1+\varepsilon)(1+f\cdot\theta)(1+\varepsilon-\delta_\rho)}. \tag{5.11}$$

Для установления угла конусности детали, которую можно получить из условия предельного формообразования, используем условие постоянства объема металла заготовки и детали, допуская, что $S_{дет}$ постоянна и соответствует толщине кромки:

$$V_{заг} = V_{дет},$$

$$F_{заг}S_{заг} = F_{дет}S_{дет}, \tag{5.12}$$

где $V_{заг}$, $V_{дет}$ – объем заготовки, объем детали;

$F_{заг}$, $F_{дет}$ – площадь заготовки, площадь детали.

Запишем равенство (5.12) с учетом обозначений (см. рисунок 5.2):

$$\pi\left(R^2 - r_0^2\right)S_{заг} = \frac{\pi\left(R^2 - r^2\right)}{2\cos\theta}S_{дет},$$

$$1-\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 = \frac{S_{дет}}{2S_{заг}}\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right]\frac{1}{\cos\theta}.$$

С учетом отношений (5.3) и (5.9) находим:

$$\cos\theta = \frac{\frac{\left(1-0{,}5\delta_p\right)}{2}\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right]}{1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\frac{1}{\left(1+\delta_p\right)^2}}. \tag{5.13}$$

Определив по формулам (5.13), (5.6) угол θ и $\sigma_{\rho}^{отб}$ при заданных геометрических значениях детали $\frac{r}{R}$ и механических свойствах материала δ_p, находим условие последовательного максимально возможного деформирования заготовки по схеме формовка-отбортовка для конической детали. Оно определяется геометрическим соотношением $\frac{r_0}{R_б}$ и позволяет вычислить высоту конической детали. На рисунке 5.3 приведен пример расчета для материала: сталь 12Х18Н10Т.

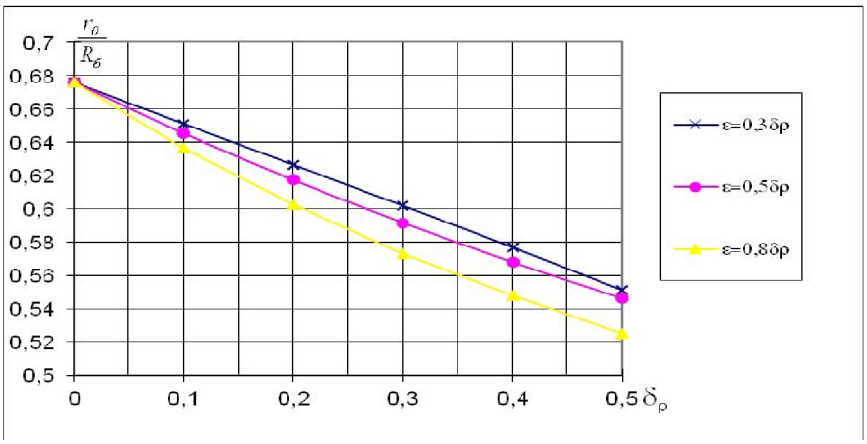

Рисунок 5.3 – Зависимость отношения $\frac{r_0}{R_б}$ от δ_p при $\frac{r}{R}=0{,}3$; $\frac{r_n}{S_{заг}}=0{,}3$; коэффициент трения $f=0{,}15$

Для интенсификации процесса и получения глубоких конических деталей следует уменьшить соотношение $\frac{r_0}{R_б}$ и увеличить угол θ. Однако, основным ограничением является показатель пластических свойств материала δ_p. Анализ формул (4.13) и (4.6) показывает, что с увеличением δ_p увеличивается угол θ и уменьшается отношение $\frac{r_0}{R_б}$. Это позволяет получить более высокую коническую деталь.

6 Анализ процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов

6.1 Механизм процесса формовки

Технология изготовления тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы включает часто деформирование разжимными секционными пуансонами. Но получаемые детали после штамповки по окружности в тангенциальном (широтном) направлении имеют недопустимую огранку, из-за которой геометрические формы детали не соответствуют поставленным требованиям, ухудшаются эксплуатационные характеристики изделия. Получение качественной тонкостенной осесимметричной детали усеченной сужающейся формы без огранки за один ход пресса достигается за счет устройства (см. рисунок 6.1), которое состоит из пуансона 1, жестко соединенного с матрицей 2, эластичного элемента 3 в виде конической оболочки, раздвижных секторов 4, конуса с направляющими пазами 5, опорного кольца 6, шпилек 7, установленных в плиту пресса 8. Устройство работает следующим образом. Опорное кольцо 6 поднято вверх. Пуансон с матрицей отведены кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки 10. Раздвижные секторы 4 подняты вверх вместе с эластичным элементом 3. В этом положении устанавливают конусную заготовку сверху на эластичный элемент. Далее опускается пуансон с матрицей до упора на опорное кольцо 6. При этом рабочие поверхности в элементах наибольшего и наименьшего диаметров касаются эластичного элемента. Рабочая поверхность матрицы $h_м$ по высоте меньше высоты заготовки $h_з$, а высота эластичного элемента $h_э$ равна высоте матрицы h. При движении пуансона вниз вместе с ним опускается и матрица 2, преодолевая сопротивление опорного кольца 6, раздвижных секторов 4 и эластичного элемента 3 вместе с заготовкой 10. Секторы, опускаясь вниз по конусу 5, увеличиваются в диаметре. При этом увеличивается в диаметре и эластичный элемент, который начинает деформировать давлением изнутри

заготовку, плотно прижимая ее к рабочей поверхности матрицы. Полученную деталь 9 удаляют, подняв сначала пуансон с матрицей, а затем опорное кольцо 6.

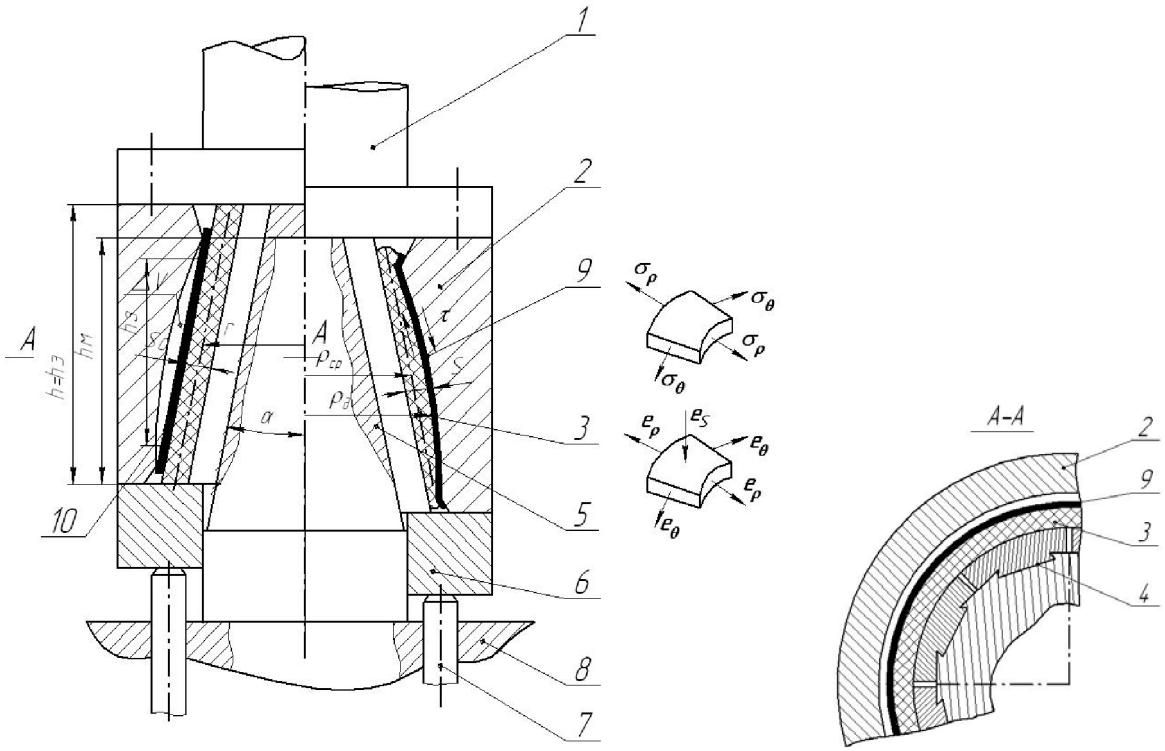

Рисунок 6.1 – Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы

Чтобы избежать при увеличении диаметра эластичного элемента уменьшения его высоты и возникновения на поверхности контакта с заготовкой сжимающих сил трения, которые могут привести к потере устойчивости тонкостенной заготовки, эластичный элемент в районах наибольшего и наименьшего диаметров матрицы зажимается (в начальный момент) между матрицей и секторами. Для надежного обеспечения условия зажима эластичного элемента необходимо, чтобы его высота была больше высоты рабочей поверхности, но не превышала общую высоту матрицы, иначе эластичный элемент может попасть в зазор между матрицей 2 и секторами 4. Это устраняет сжимающие силы трения на внутренней поверхности заготовки. Эластичный элемент, деформируясь, увеличивает диаметр и уменьшает толщину, то есть соответствует условию плоского деформированного состояния, когда деформация по толщине ε_S равна по

величине и противоположна по знаку деформации увеличения диаметра эластичного элемента ε_θ. Используя условие постоянства объема для эластичного элемента, приближенно можно записать:

$$\varepsilon_S \approx -\varepsilon_\theta \text{ или}$$

$$\frac{\rho_{ср} - r}{r} \approx -\frac{S - S_0}{S_0}, \qquad (6.1)$$

где $\rho_{ср}, r$ – соответственно радиусы по средней поверхности средние по очагу эластичного элемента до и после деформации;

S_0, S – соответственно толщины эластичных элементов средние по очагу до и после деформации.

Несмотря на уменьшение толщины эластичного элемента, прирост объема ΔV_ρ его за счет увеличения диаметра должен компенсировать разницу между внутренним объемом, ограниченным рабочей поверхностью матрицы и объемом, ограниченным наружной поверхностью эластичного элемента в исходном состоянии ΔV.

$$\Delta V_\rho = \Delta V \text{ или}$$

$$\pi \frac{\left(\rho_{ср}{}^2 - r^2\right)^2}{\cos\alpha} h_м = \Delta V, \qquad (6.2)$$

где $h_м$ – высота рабочей поверхности матрицы;

α – угол конусности конуса.

Выразим r из (6.1) и, подставив его в (6.2), после преобразований получим:

$$\rho_{ср} = \left(2 - \frac{S}{S_0}\right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos\alpha}{\pi \cdot h_м \left[\left(2 - \frac{S}{S_0}\right)^2 + 1\right]}}. \qquad (6.3)$$

Приняв во внимание, что $\rho = \rho_д - 0{,}5S$, имеем:

$$S = 2\left(\rho_д - \left(2 - \frac{S}{S_0}\right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos\alpha}{\pi \cdot h_м \left[\left(2 - \frac{S}{S_0}\right)^2 + 1\right]}}\right). \qquad (6.4)$$

Исходную толщину эластичного элемента найдем, поставив ограничения по степени деформации:

$$\frac{S}{S_0} \le k \le 0{,}9 \div 0{,}75 \text{ или}$$

$$S_0 = \frac{S}{k}, \tag{6.5}$$

где

$$S = 2\left(\rho_\partial - (2-k)\sqrt{\frac{\Delta V \cos\alpha}{\pi \cdot h_м\left[(2-k)^2+1\right]}}\right), \tag{6.6}$$

где ρ_∂ – средний радиус детали.

6.2 Теоретический анализ процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов

Заготовка, как и эластичный элемент, зажата неподвижно на кромках наибольшего и наименьшего диаметров. При таком условии на кромках тангенциальная деформация равна нулю, а соотношение напряжений $\sigma_\theta / \sigma_\rho = 0{,}5$ (из условия связи напряжений и деформаций). Примем это соотношение для всех элементов очага деформации.

Будем считать, что трение является уравновешивающимся. Запишем известное уравнение равновесия:

$$\rho\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta + \frac{\rho \cdot f}{\sin\alpha}\left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}\right) = 0, \tag{6.7}$$

где σ_ρ – напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ – напряжения в тангенциальном направлении;

f – коэффициент трения между заготовкой и матрицей;

R_ρ – радиус детали в меридиональном направлении;

R_θ – радиус детали в тангенциальном направлении;

ρ – текущая координата элемента очага деформации.

Используя соотношения $\sigma_\theta / \sigma_\rho = 0{,}5$ и условие пластичности $\sigma_\rho = \beta\sigma_S$, имеем:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{1}{2}\sigma_S + \frac{\sigma_\rho \cdot f}{\sin\alpha}\left(\frac{1}{R_\rho} + \frac{1}{2R_\theta}\right) = 0. \tag{6.8}$$

Упрочнение учтём линейной функцией:

$$\sigma_S = (\sigma_{T_0} + \Pi e_i)\beta\,, \tag{6.9}$$

где σ_{T_0}, Π – константы упрочнения линейной зависимости;

β – коэффициент Лоде.

При формовке, когда $e_S = -e_\rho - e_\theta$, можно считать $e_i \approx |e_S|$ по абсолютной величине, тогда:

$$\sigma_\rho = \sigma_S = \beta(\sigma_{T_0} + \Pi e_S),\ \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = \beta\frac{de_S}{d\rho}\,. \tag{6.10}$$

Подставим (6.10) в (6.8), получим:

$$\frac{de_S}{d\overline{\rho}} + (\overline{\sigma_{T_0}} - e_S)\left(\frac{1}{2\overline{\rho}} + K + \frac{l}{2\overline{\rho}}\right) = 0\,, \tag{6.11}$$

где $\overline{\sigma_{T_0}} = \frac{\sigma_{T_0}}{\Pi}$; $K = \frac{f}{\overline{R_\rho}\sin\overline{\alpha}}$; $l = f\mathrm{ctg}\overline{\alpha}$; $\overline{\alpha} = \frac{\alpha_0}{2} = \mathrm{const}$; $\overline{\rho} = \frac{\rho}{R_б}$; $\overline{R_\rho} = \frac{R_\rho}{R_б}$.

Уравнение (6.11) имеет неизвестную деформацию по толщине от независимой переменной ρ. Решение ищем в виде:

$$e_S = -c\sin\left(\frac{1-\overline{\rho}}{1-\overline{\rho}_0}\pi\right). \tag{6.12}$$

На кромках при формовке деформацию e_S принимаем равной нулю, т.е. при граничных условиях: $\overline{\rho} = \frac{\rho}{R_б} = 1$; $\overline{\rho_0} = \frac{\rho_0}{R_б}$; уравнение (6.12) примет вид $e_S = 0$.

Функция (6.12) имеет экстремум. Его определим из условия $\frac{de_S}{d\overline{\rho}}$=0 и получим:

$$\overline{\rho}_c = \frac{\overline{\rho}_0 + 1}{2}. \tag{6.13}$$

Используя метод ортогонализации [44], найдем постоянную c, подставив (6.12) в уравнение (6.11):

$$c = \frac{\frac{2}{\pi}\overline{\sigma}_{T_O}\left(\frac{1+2l}{2\overline{\rho}_c} + K\right)\left(1-\overline{\rho}_0\right)}{\left(\frac{1+2l}{2\overline{\rho}_c} + K\right)\left(1-\overline{\rho}_0\right)+1}. \tag{6.14}$$

Толщину детали вычислим по формуле:

$$S_{дет} = S_{заг}(1 - e_S). \tag{6.15}$$

Используя формулу Лапласа, найдем давление:

$$q = \beta \cdot S_{заг}(1 - e_S)(\sigma_{T_0} + \Pi e_S)\left(\frac{1}{R_\rho} + \frac{1}{R_\rho - a/\cos\frac{\alpha_0}{2}}\right). \qquad (6.16)$$

Выражение (6.16) имеет экстремум от деформации по толщине. Считая $\overline{\alpha} = \frac{\alpha_0}{2}$ постоянным, определим деформацию, при которой давление максимально:

$$e_{S_{\max}} = \frac{1 - \overline{\sigma_{T_0}}}{2}. \qquad (6.17)$$

Последнее выражение не должно превышать равномерное удлинение δ_p (показатель пластических свойств материала).

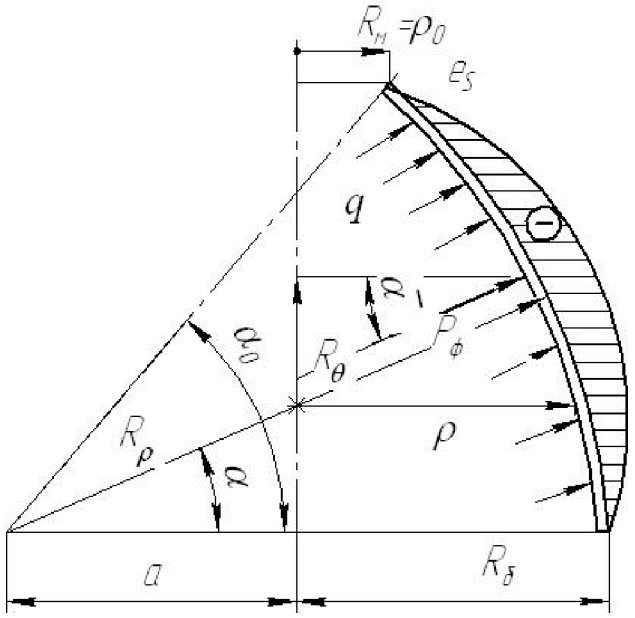

Рисунок 6.2 – Схема для определения геометрических соотношений и эпюра деформации по толщине:
R_ρ – радиус детали в меридиональном направлении;
α_0 – угол, образованный радиусом R_ρ, проведенным к кромке детали меньшего основания, и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали; α – угол, образованный радиусом R_ρ, проведенным к рассматриваемому элементу, и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали; $R_б$ – радиус большего основания детали; $R_м$ – радиус меньшего основания детали; R_θ – радиус детали в тангенциальном направлении; a – расстояние от центра радиуса R_ρ до оси симметрии; q – давление; $\overline{\alpha}$ – угол между результирующей силой, приложенной в центре очага деформации, и осью симметрии

Подставив (6.17) в (6.16), найдем максимально возможное давление эластичной среды на заготовку. Считаем: давление действует равномерно по всей площади заготовки; поверхность наклона конуса перпендикулярна результирующему усилию от давления. Найдем усилие:

$$P_{ф} = qFf_1 \sin\overline{\alpha}, \tag{6.18}$$

где f_1 – коэффициент трения сектора по конусу;

$\overline{\alpha}$ – угол конусности конуса;

F – площадь поверхности очага деформации, равная:

$$F = 2\pi R_{\rho}\left[R_{\rho}\sin\alpha_0 - a\cdot\alpha_0\right];\ \overline{\alpha} = \frac{\alpha_0}{2}. \tag{6.19}$$

Общее усилие составляет:

$$P = P_{ф} + P_{эл.эл.} + P_{б}, \tag{6.20}$$

$$P_{эл.эл.} = \pi\left(D^2 - d^2\right)q, \tag{6.21}$$

где $P_{б}$ – усилие необходимое для преодоления буферного устройства.

Список использованных источников

1. А. с. 1050778 А СССР, МКИ^3 В 21 D 22/28. Способ штамповки цилиндрических деталей с коническим участком со стороны открытого торца [Текст] / В.П. Чистяков, И.П. Попов, А.Г. Овчинников, В.Д. Маслов и др. (СССР). – № 3431168/25-27; заявл. 27.04.82; опубл. 30.10.83, Бюл. № 40.
2. А. с. 1349836 А1 СССР, МКИ^3 В 21 D 22/28. Заготовка для вытяжки с обжимом [Текст] / В.П. Чистяков, И.П. Попов, В.Д. Маслов, А.И. Гостев (СССР). – № 4117648/31-27; заявл. 28.05.86; опубл. 07.11.87, Бюл. № 41.
3. А. с. 1391773 А1 СССР, МКИ^3 В 21 D 22/28. Способ штамповки полых деталей [Текст] / В.П. Чистяков, И.П. Попов, В.Д. Маслов [и др.] (СССР). – № 4141544/31-27; заявл. 03.11.86; опубл. 30.04.88, Бюл. № 16.
4. А. с. 1447480 СССР, МКИ^1 В 21 D 22/16. Способ изготовления тонкостенных конических деталей [Текст] / Б.А. Асвободинов, В.И. Шашков, Е.А. Филатова (СССР). – № 4213222/25-27; заявл. 04.02.87; опубл. 30.12.88, Бюл. № 48.
5. А. с. 1454545 А1 СССР, МКИ^3 В 21 D22/28. Способ штамповки конических деталей [Текст] / И.П. Попов, А.Н. Карпухин, В.Д. Маслов (СССР). – № 4285746/31-27; заявл. 15.07.87; опубл. 30.01.89, Бюл. № 4.
6. А. с. 1465152 СССР, МКИ^4 В 21 D22/16. Способ изготовления тонкостенных оболочек [Текст] / А.С. Чумадин, В.И. Ершов, А.Д. Ковалев, Е.М. Дебердеев (СССР). – № 4017195/31-27; заявл. 04.02.86; опубл. 05.03.89, Бюл. № 10.
7. А. с. 1563813 СССР, МКИ^5 В 21 D 41/02. Способ раздачи оболочки [Текст] / А.Н. Шипилов, С.А. Шульга (СССР). – № 4405224/31-27; заявл. 06.04.88; опубл. 15.05.90, Бюл. № 18.
8. А. с. 1748905 СССР, МКИ^5 В 21 D22/30. Способ штамповки тонкостенных осесимметричных изделий [Текст] / И.П. Попов, В.Д. Маслов, А.Н. Карпухин (СССР). – № 4760202; заявл. 23.11.89; опубл. 23.07.92, Бюл. № 27.
9. А. с. 633643 СССР, МКИ^2 В 21 D 22/28. Способ штамповки полых осесимметричных изделий [Текст] / В.П. Чистяков, И.П. Попов, А.Г. Овчинников, В.Д. Маслов (СССР). – № 2373144/25-27; заявл. 14.06.76; опубл. 25.11.78, Бюл. № 43.
10. А. с. 755378 СССР, МКИ^4 В 21 D 22/10. Способ штамповки эластичной средой [Текст] / В.К. Моисеев, В.Ф. Щеголеватых, А.Д. Комаров, Т.П. Голиусов, В.Е. Гальперин (СССР). – опубл. 1980, Бюл. № 30.

11. Аверкиев, А.Ю. Деформации и напряжения при раздаче полых оболочек секционным и разжимными пуансонами [Текст] / А.Ю. Аверкиев // Вестн. машиностроения. – 1996. – № 2. – С. 33-37.
12. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла [Текст] / А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
13. Аверкиев, Ю.А. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением [Текст] / Ю.А. Аверкиев. – М. – Л.: Машгиз, 1957. – 215 с.
14. Аверкиев, Ю.А. Холодная штамповка [Текст] / Ю.А. Аверкиев. – Изд-во Ростов. ун-та, 1984. – 288 с.
15. Машиностроение. Энциклопедия. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 [Текст] / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов [и др.]; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. – М.: Машиностроение, 1996. – 736 с.
16. Алюшин, Ю.А. Формоизменение полых оболочек секционным разжимным инструментом [Текст] / Ю.А. Алюшин, А.Н. Шипилов // Машиноведение. – 1987. – № 1. – С. 98-104.
17. Арышенский, Ю.М. Получение рациональной анизотропии в листах [Текст] / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников, В.Ю. Арышенский. – М.: Металлургия, 1987. – 141 с.
18. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов [Текст] / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
19. Арышенский, Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов [Текст] / Ю.М. Арышенский. – М.: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. – 112 с.
20. Барвинок, В.А. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов [Текст] / В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров. – М.: Наука и технологии, 2002. – 198 с.
21. Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст] / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: «Вища школа», 1977. – 168 с.
22. Братухин, А.Г. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей [Текст] / А.Г. Братухин; под ред. А.Г. Братухина, Г.К. Язова, Б.Е. Карасева. – М.: Машиностроение, 1997. – 416 с.
23. Глущенков, В.А. Специальные виды штамповки. Ч. 1. Штамповка эластичными средами [Текст]: учеб. пособие / В.А. Глущенков. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2008. – 72 с.

24. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением [Текст] / В.А. Голенков, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь [и др.]. – М.: Машиностроение, 2004. – 464 с.
25. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов [Текст] / Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
26. Григорьев, Л.Л. Холодная штамповка [Текст]: справ. / Л.Л. Григорьев, К.М. Иванов, Э.Е. Юргенсон. – СПб.: Политехника, 2009. – 665 с.
27. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением [Текст] / Н.П. Громов. – М.: Металлургия, 1967. – 340 с.
28. Громова, А.Н. Изготовление деталей из листов и профилей при серийном производстве [Текст] / А.Н. Громова, В.И. Завьялова, В.К. Королев. – М.: Оборонгиз, 1960. – 344 с.
29. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением [Текст] / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
30. Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением [Текст] / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.
31. Демьяненко, Е.Г. Возможности процесса вытяжки тонкостенных конических оболочек [Текст] / Е.Г. Демьяненко // Тез. докл. Всерос. молод. науч. конф. с международ. участием IX Королевские чтения / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – 2007. – С. 178.
32. Демьяненко, Е.Г. Направленное изменение толщины конической оболочки [Текст] / Е.Г. Демьяненко // Тез. докл. Международ. молод. науч. конф. XV Туполевские чтения / Казан. гос. техн. ун-т. – 2007. – Т. 1. – С. 52-54.
33. Демьяненко, Е.Г. Основные допущения процесса формовки для получения тонкостенных деталей с постоянной толщиной стенки [Текст] / Е.Г. Демьяненко // Тез. докл. Международ. науч. конф. XII Решетневские чтения / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. – 2008. – С. 199-201.
34. Демьяненко, Е.Г. Устройство для формовки вогнутых оболочек [Текст] / Е.Г. Демьяненко // Тез. докл. Международ. молод. науч. конф. XVI Туполевские чтения / Казан. гос. техн. ун-т. – 2008. – Т. 1. – С. 61-63.
35. Демьяненко, Е.Г. Устройство для формовки выпуклых оболочек [Текст] / Е.Г. Демьяненко // Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов. Актуальные проблемы авиации и космонавтики / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. – 2008. – Т. 1. – С. 88-89.

36. Дмитриев, А.М. Аппроксимация кривых упрочнения металлов [Текст] / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов // КШП ОМД. – 2004. – № 1. – С. 23-26.
37. Дмитриев, А.М. Технология ковки объемной штамповки. Ч. 1. Объемная штамповка выдавливанием [Текст] / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов. – М.: Высшая школа, 2002. – 400 с.
38. Ершов, В.И. Листовая штамповка. Справочник. Расчет технологических параметров [Текст] / В.И. Ершов, О.В. Попов, А.С. Чумадин. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 516 с.
39. К методике кривых упрочнения [Текст] / Ю.В. Зильберг, В.Г. Братутин, З.В. Каневский [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 6. – С. 8-11.
40. Определение оптимальных условий штамповки осесимметричных оболочек оживальной формы [Текст] / А.А. Имшенецкий, В.П. Сабелькин, В.А. Кривцов [и др.]; Харьк. авиац. ин-т. – Харьков, 1990. – 7 с. – Деп. в ВНИИТЭМР 26.07.90, № 153-мш90.
41. Исаченков, Е.И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением [Текст] / Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
42. Исаченков, Е.И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст] / Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
43. Исследование процессов формообразования цельноштампованных деталей по схеме эластичный пуансон – жесткая матрица и сварных оболочек по схеме раздача – растяжение [Текст]: отчет о НИР (промежут.); рук. И.П. Попов; исполн. В.Д. Маслов. – Куйбышев, 1989. – 62 с. – № гос. регистрации У55463.
44. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
45. Каргин, В.Р. Основы инженерного эксперимента [Текст]: учеб. пособие/ В.Р. Каргин, В.М. Зайцев. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. – 86 с.
46. Каржавин, В.В. Совершенствование технологии изготовления полых коническо-цилиндрических изделий из сплава АМг6 [Текст] / В.В. Каржавин, Ю.Б. Пирогов, Е.М. Файншмидт // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 1. – С. 22-23.
47. Катков, Н.П. Расчет усилия прижима, предотвращающего складкообразование при вытяжке круглых изделий [Текст] / Н.П. Катков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 12. – С. 24-26.

48. Колесов, Ю.Б. Совершенствование процесса вытяжки тонкостенных изделий [Текст] / Ю.Б. Колесов // Исследование машин и технологии кузнечно-штамповочного производства: темат. сб. науч. тр. – 1990. – С. 93-96.
49. Колесов, Ю.Б. Технология вытяжки тонкостенных деталей [Текст] / Ю.Б. Колесов // Новые промышленные технологии. – 1996. – № 4. – С. 3-6.
50. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн; под общ. ред. И.Г. Арамановича. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
51. Контактное трение в процессах ОМД [Текст] / А.Н. Леванов, В.Л. Колмагоров, С.Л. Буркин [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
52. Лысов, М.И. Пластическое формообразование тонкостенных деталей авиатехники [Текст] / М.И. Лысов, И.М. Закиров. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
53. Лысов, М.И. Формообразование деталей гибкой [Текст] / М.И. Лысов, Н.В. Соснов. – М.: Машиностроение, 2001. – 388 с.
54. Малов, А.Н. Технология холодной штамповки [Текст] / А.Н. Малов. – М.: Машиностроение, 1969. – 568 с.
55. Мельников, Э.Л. Секционный штамп для формообразования полых изделий из листовых материалов [Текст] / Э.Л. Мельников // Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – № 7. – С. 24-25.
56. Мельников, Э.Л. Холодная штамповка днищ жидкостью [Текст] / Э.Л. Мельников. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
57. Михеев, В.А. Метод получения обводообразующих оболочек с минимальной разнотолщинностью способами обтяжки [Текст] / В.А. Михеев, Д.В. Щуровский // Обработка металлов. – 2006. – № 3(20). – С. 24-26.
58. Моисеев, В.К. Управление разнотолщинностью полых изделий посредством эластичного инструмента [Текст] / В.К. Моисеев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2004. – № 1. – С. 100-104.
59. Моисеев, В.К. Штамповка осесимметричных деталей эластичным инструментом переменной жесткости [Текст] / В.К. Моисеев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – № 1. – С. 19-21.
60. Мошнин, Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей [Текст] / Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1973. – 240 с.
61. Николенко, К.А. Формообразование тонкостенных крутоизогнутых отводов в инструментальных штампах [Текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.03.05: защищена 21.03.2008 / Николенко Константин Анатольевич. – Самара, 2008. – 170 с.

62. Овчинников, А.Г. О выборе кривошипного пресса для вытяжки [Текст]/ А.Г. Овчинников // Кузнечно-штамповочное производство. – 1961. – № 12. – С. 30-33.
63. Орленко, Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках [Текст] / Л.П. Орленко. – М.: Машиностроение, 1964. – 168 с.
64. Пат. 1334474 Российская Федерация, МПК[6] B 21 D 41/02. Разжимной пуансон [Текст] / Максименков В.И., Писаренко В.Е., Вязьмикина Н.И.; заявитель и патентообладатель НИИ автоматиз. средств пр-ва и контроля. – № 3993429/27; заявл. 23.12.85; опубл. 27.06.95, Бюл. № 18.
65. Пат. 2007242 Российская Федерация, МПК[7] B 21 D2 2/14. Способ ротационной вытяжки конических изделий [Текст] / Зубарев В.В.; заявитель и патентообладатель Зубарев В.В. – № 5024612/27; заявл. 25.12.91; опубл. 15.02.94, Бюл. № 3.
66. Пат. 2148460 Российская Федерация, МПК[6] B 21 D 22/20. Способ вытяжки деталей из тонкостенных листовых заготовок [Текст] / Иванов Ю.Л.; заявитель и патентообладатель Комсомольское-на-Амуре авиац. производств. об-ние. – № 98113026/02; заявл. 29.06.98; опубл. 10.05.00, Бюл. № 13.
67. Пат. 2157739 Российская Федерация, МПК[7] B 21 D 51/08, B 21 D 22/28. Способ изготовления тонкостенных оболочек с днищем сферической формы [Текст] / Поздов И.Н.; заявитель и патентообладатель Рос. федер. ядер. центр– Всерос. науч.-исследоват. ин-т эксперим. физики. – № 98108949/02; заявл. 08.05.98; опубл. 20.10.00.
68. Пат. 58055 Российская Федерация, МПК[7]B 21 D 22/30. Устройство для формообразования оболочек сужающейся формы [Текст] / Попов И.П., Маслов В.Д., Демьяненко Е.Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – № 2006117037/22; заявл. 17.05.2006; опубл. 10.11.2006, Бюл. № 31.
69. Пат. 78709 Российская Федерация, МПК[7]B 21 D 20/30. Устройство для формообразования тонкостенных усеченных сужающихся оболочек [Текст] / Попов И.П., Демьяненко Е.Г., Десятниченко К.И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королева. – № 2008112698; заявл. 02.04.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.
70. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки [Текст] / Е.А. Попов.– М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

71. Попов, Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки [Текст] / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.– 478 с.
72. Попов, И.П. Исследование процессов листовой инструментальной штамповки деталей авиационной техники [Текст]: лаб. практикум / И.П. Попов. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1988. – 48 с.
73. Попов, И.П. Направленное изменение толщины заготовки в операциях листовой штамповки [Текст] / И.П. Попов, В.Д. Маслов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 6. – С. 19-21.
74. Попов, И.П. Направленное изменение толщины листовой заготовки в процессах пластического деформирования [Текст]: учеб. пособие / И.П. Попов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2006. – 74 с.
75. Попов, И.П. Штамп для изготовления тонкостенных сварных оболочек [Текст] / И.П. Попов, Е.Г. Демьяненко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – № 12. – С. 25-27.
76. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1965. – 226 с.
77. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
78. Семенов, Е.И. Ковка и штамповка [Текст] / Е.И. Семенов. – М.: Машиностроение, 1987. – 234 с.
79. Степанов, В.Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов [Текст] / В.Г. Степанов, И.А. Шавров. – Л.: Машиностроение, 1975.– 278 с.
80. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
81. Томленов, А.Д. Влияние анизотропии листового металла на процессы пластического формоизменения [Текст] / А.Д. Томленов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1962. – № 4. – С. 1-2.
82. Томленов, А.Д. Пластическое течение металлов [Текст] / А.Д. Томленов. – М.: Наука, 1968. – 148 с.
83. Теория ковки и штамповки [Текст]: учеб. пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров [и др.]; под общ. ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.

84. Чертавских, А.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением [Текст] / А.К. Чертавских, В.К. Белосевич. – М.: Металлургия, 1968. – 364 с.
85. Шевелев, В.В. Влияние параметров анизотропии и вытяжки на толщину стенки стакана. Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых материалов [Текст] / В.В. Шевелев. – Тула, 1968. – 253 с.
86. Шофман, Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки [Текст] / Л.А. Шофман. – М.: Машиностроение, 1964. – 375 с.
87. Щуровский, Д.В. Расчет напряженно-деформированного состояния заготовки при формообразовании обтяжкой оболочки двояковыпуклой формы с минимальной разнотолщинностью [Текст] / Д.В. Щуровский // Тез. докл. Всерос. молод. науч. конф. VII Королевские чтения / Изд-во Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2003. – Т. 1. – С. 174-175.

Учебное издание

Демьяненко Елена Геннадьевна,
Попов Игорь Петрович

ТЕХНОЛОГИЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Часть 1
СПОСОБЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРОЦЕССАХ ФОРМОВКИ, ОТБОРТОВКИ И ВЫТЯЖКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Учебник

Редактор Т. С. З и н к и н а
Доверстка А. В. Я р о с л а в ц е в а

Подписано в печать 10.10.2011 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 7,0.
Тираж 100 экз. Заказ . Арт. С-5(Д2)/2011.

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.