

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)» (СГАУ)

Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150700.62 «Машиностроение»

САМАРА
Издательство СГАУ
2014

УДК 629.7.01(075)

ББК 39.5.я7

Д32

Рецензенты: д-р техн. наук проф. Ю. С. Е л и с е е в,
д-р техн. наук, проф. В. Н. С а м о х в а л о в

Демьяненко Е.Г.

Д32 **Проектирование технологических процессов формообразования тонкостенных осесимметричных деталей летательных аппаратов:** учеб. пособие / *Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов.* – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. - 144 с.

ISBN 978-5-7883-0971-2

Обоснованы 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 об инновационных способах пластического деформирования тонкостенных осесимметричных заготовок в условиях всестороннего растяжения для деталей усеченной сужающейся формы. Рассмотрены и проанализированы известные процессы формообразования подобных деталей.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям укрупненной группы 150000. Металлургия, машиностроение и материаловедение и инженерно-технических работников, преподавателей вузов, специализирующихся в технологии листовой штамповки.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

УДК 629.7.01(075)

ББК 39.5.я7

ISBN 978-5-7883-0971-2

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Основные условные обозначения	5
Введение	6
1 Классификация оболочек по конструктивно-геометрическому признаку	10
2 Способы получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы из кольцевой плоской заготовки с использованием процесса отбортовки	12
<i>2.1 Определение толщины детали процесса отбортовки плоской кольцевой заготовки в коническую деталь.....</i>	<i>14</i>
<i>2.2 Определение относительной высоты детали.....</i>	<i>17</i>
<i>2.3 Определение пружинения при отбортовке.....</i>	<i>20</i>
<i>2.4 Исследование способа формообразования из кольцевой заготовки с использованием процессов отбортовки и формовки</i>	<i>21</i>
3 Способы получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы из конической заготовки с использованием процесса формовки.....	26
<i>3.1 Анализ напряженно-деформированного состояния процесса формовки.....</i>	<i>36</i>
3.1.1 Допущение о плоскодеформированном состоянии.....	36
3.1.2 Учет упрочнения	42
3.1.3 Допущение о создаваемом давлении эластичным элементом	44
3.1.4 Определение напряжений, деформаций, усилия и давления процесса	45
<i>3.2 Определение предельных параметров процесса формовки для получения тонкостенных осесимметричных деталей</i>	<i>54</i>
3.2.1 Теоретическая оценка применимости процесса формовки с использованием эластичного элемента	54
3.2.1.1 Формовка выпуклой детали	55
3.2.1.2 Формовка вогнутой детали	57
3.2.1.3 Формовка вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой детали.....	59
3.2.1.4 Формовка вогнуто-конической и выпукло-конической детали....	60
3.2.1.5 Формовка с активными силами трения	61
3.2.2 Теоретическая оценка применимости процесса формовки при отсутствии эластичного элемента.....	67
3.2.2.1 Формовка выпуклой детали	67
3.2.2.2 Формовка конической детали.....	68
3.2.3 Определение величины критической степени деформаций.....	68
4 Способы получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы из конической заготовки с использованием процесса отбортовки (обтяжки).....	69

4.1 Анализ напряженно-деформированного состояния процесса отбортовки (обтяжки).....	86
4.2 Исследование способа формообразования деталей из конической заготовки	88
4.3 Исследование способа формообразования деталей из цилиндрической заготовки	104
4.3.1 Исследование способа формообразования деталей усеченной сужающейся формы из цилиндрической заготовки.....	104
4.3.2 Исследование способа формообразования деталей бочкообразной формы из цилиндрической заготовки	112
5 Выбор способа формообразования, последовательность проектирования и расчет технологического процесса тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся и бочкообразной формы в условиях схемы напряженного состояния плоского растяжения	120
5.1 Проектирование из кольцевой заготовки.....	120
5.2 Проектирование из конусной сварной заготовки с использованием процесса формовки.....	122
5.2.1 Определение размеров конической заготовки	122
5.2.2 Определение размеров развертки конической заготовки	128
5.2.3 Определение давления, создаваемого эластичным элементом, эластичным буфером, и усилие процесса.....	131
5.3 Проектирование из конусной сварной заготовки с использованием процесса отбортовки (обтяжки)	132
5.4 Проектирование из цилиндрической заготовки.....	132
5.5 Проектирование деталей бочкообразной формы	133
5.6 Проектирование элементов оснастки	133
Список использованных источников	139

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, детали, мм³;
 $F_{заг}$, $F_{дет}$ - площадь заготовки, площадь детали, мм²;
 $S_{заг}$, $S_{дет}$ - толщина заготовки, толщина детали, мм;
 e_i - интенсивность деформаций;
 Π - модуль упрочнения;
 σ_S - напряжение текучести, МПа;
 σ_{T_0} - экстраполированный предел текучести, МПа;
 k - коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента, 1/мм;
 σ_e - 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_3 - диаметр меньшего основания заготовки с учетом припуска под зажимы, мм;
 D_3 - диаметр большего основания заготовки с учетом припуска под зажимы, мм.

Введение

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 [12].

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 : $0,5 < \frac{H}{D} \leq 0,7$ 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. Для избежания 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 [52]. 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 со вмещением 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.

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 формообразования.

Область применения тонкостенных осесимметричных деталей представлена на рис. 1-5.



Рисунок 1 - Жидкостный ракетный двигатель



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



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



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



Рисунок 5 - Штамповка оболочки бытового отсека, алюминиевый сплав АД1, габаритные размеры: диаметр - 2500 мм; высота - 1500 мм; толщина - 2...3 мм

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 [28].

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 $\frac{S_{заг}}{D} < 0,008$ [54] (рассматриваемая относительная высота H : $0,5 < \frac{H}{D} \leq 0,7$ и отношение диаметров: $\frac{D}{d} = 1,7 \div 2,2$).

На рис. 1.1 приведена классификация по геометрическим признакам: по форме в соответствии с основными конструктивными понятиями.

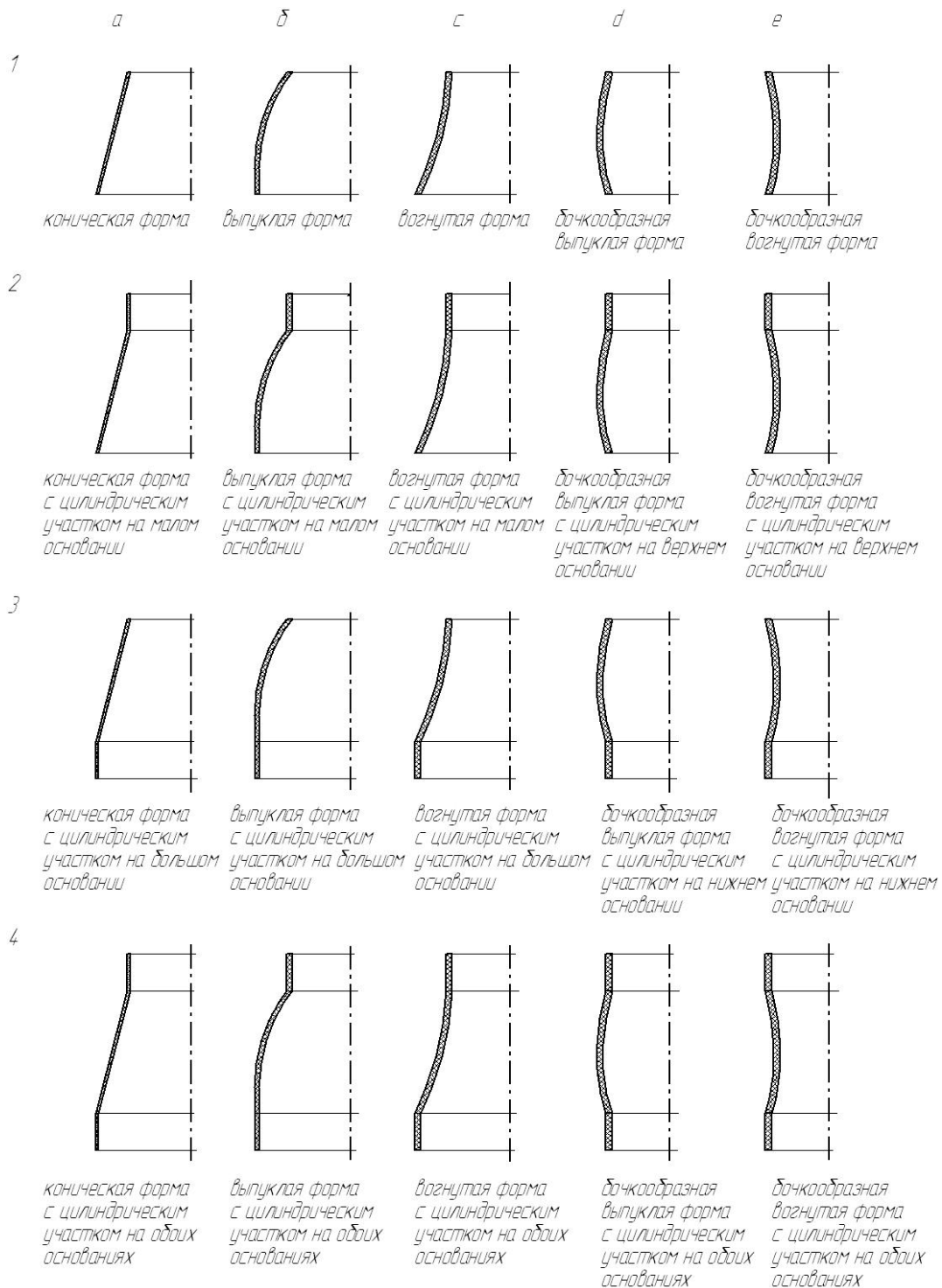


Рисунок 1.1 - Типовые контуры деталей

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_p , связанному с другими геометрическими параметрами (рис. 1.2).

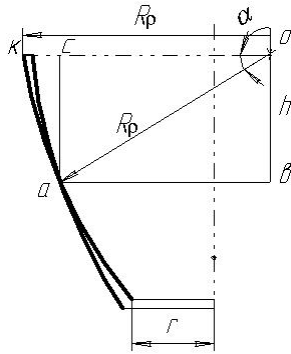


Рисунок 1.2 - Основные геометрические размеры деталей:

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:

$$(R_\rho - kc)^2 + h^2 = R_\rho^2, \quad (1.1)$$

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:

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

2 Способы получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы из кольцевой плоской заготовки с использованием процесса отбортовки

Задача получения деталей выпуклой формы может быть решена способом изготовления, заключающимся в отбортовке заготовки путем удерживания ее за фланец со стороны большого открытого торца (рис. 2.1).

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 предель-

ным значением коэффициента отбортовки k_0 , равным отношению диаметра заготовки до отбортовки к диаметру заготовки после отбортовки. Схема на рис. 2.1 применима для тех деталей, которые легко отбортовываются [26],

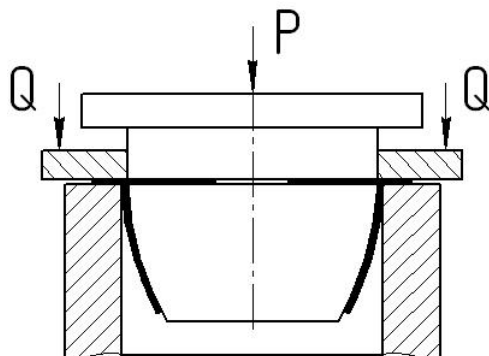


Рисунок 2.1 - Схема отбортовки в инструментальном штампе тонкостенных заготовок

но возникающее пружинение кромки большого торца требует значительных дополнительных трудозатрат, например термофиксации [5]. 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 (рис. 2.2).

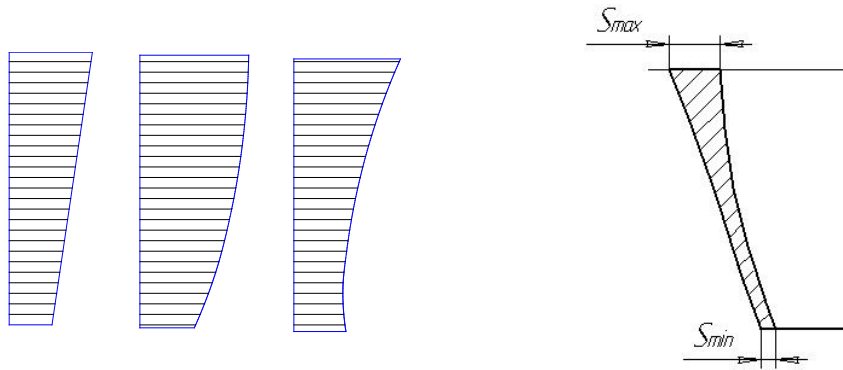


Рисунок 2.2 - Характер изменения толщин вдоль образующей тонкостенных осесимметричных деталей, получаемых способом отбортовки при разных значениях коэффициента трения

2.1 Определение толщины детали процесса отбортовки плоской кольцевой заготовки в коническую деталь

Проанализируем возможности получения деталей способом отбортовки из кольцевой заготовки коническим пуансоном (рис. 2.3).

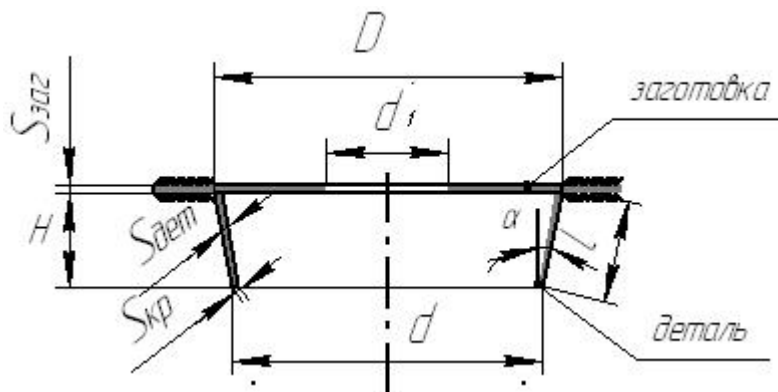


Рисунок 2.3 - Схема процесса отбортовки из кольцевой заготовки:

D - большой 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

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. Же-

лательно, 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 [57]:

$$S_{кр} = S_{заг} \sqrt{\frac{I}{k_{отб}}}, \quad (2.1)$$

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

В качестве первого приближения можно взять функцию распределения толщины:

$$S_1 = a + b\rho, \quad (2.2)$$

где a и b - const.

Используя условие колокации [30], определим коэффициенты a и b , считая

$$S = S_{кр} = S_{заг} \sqrt{\frac{I}{k_{отб}}} \text{ при } \rho = r_{кр}; \quad S = S_{заг} \text{ при } \rho = R:$$

$$a = S_{заг} + \left(\frac{S_{заг} \sqrt{\frac{I}{k_{отб}}} - S_{заг}}{R - r_{кр}} \right) R, \quad b = - \frac{S_{заг} \sqrt{\frac{I}{k_{отб}}} - S_{заг}}{R - r_{кр}}. \quad (2.3)$$

Значения толщины $S_{дем}$ во втором приближении найдем из уравнения связи напряжений и деформаций [57]:

$$S_{дем} = S_2 = S_{заг} \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\frac{\sigma_{\rho+1}}{\sigma_{\theta}}}{2 - \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}}}. \quad (2.4)$$

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

$$V'_{\text{дем}} = \frac{\pi(R^2 - \rho^2)}{\sin \alpha} S'_{\text{сп}}, \quad (2.5)$$

где $S'_{\text{сп}} = \frac{S_{\text{заз}} + a + b\rho}{2}$ - это средняя толщина части детали между координатами

R и ρ . Для заготовки этот объем ограничен координатами R и r .

$$V'_{\text{дем}} = \pi(R^2 - r^2)S_{\text{заз}}. \quad (2.6)$$

Приравняв выражения (2.5) и (2.6), находим:

$$r = \sqrt{-\frac{S_{\text{заз}} + a + b\rho}{2 S_{\text{заз}}} \cdot \frac{R^2 - \rho^2}{\sin \alpha} + R^2}. \quad (2.7)$$

Соотношение напряжений $\sigma_\rho / \sigma_\theta$, как показали исследования [57,36], можно использовать без учета упрочнения. Для определения напряжений без учета упрочнения запишем уравнение равновесия с учетом изменения толщины [57]:

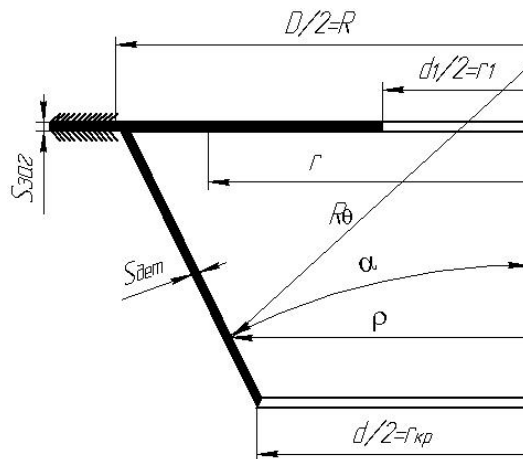


Рисунок 2.4 - Схема для определения соотношения координат элементов заготовки и детали

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left(1 + \frac{\rho dS_1}{S_{\text{дем}} d\rho} \right) - \sigma_\theta - \frac{f\rho}{\sin \alpha} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (2.8)$$

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 (2.4):

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

С учетом принятых допущений и условия пластичности [57]

$$\sigma_\theta = \sigma_s, \quad (2.9)$$

решение уравнения (2.8) приводится к виду

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left\{ \frac{a}{(a+b\rho)(1-fctg\alpha)} + \frac{b\rho}{(2-fctg\alpha)(a+b\rho)} - \left(\frac{r_{кр}}{\rho} \right)^{1-fctg\alpha} \right. \times \quad (2.10)$$
$$\left. \times \left(\frac{a+b r_{кр}}{(a+b\rho)} \right) \left(\frac{a}{(1-fctg\alpha)(a+b r_{кр})} + \frac{b r_{кр}}{(2-fctg\alpha)(a+b r_{кр})} \right) \right\}$$

2.2 Определение относительной высоты детали

Сравним полученные значения толщин в 1^m и 2^m приближениях, (формулы (2.2), (2.4)), построив графики для разных коэффициентов трения (от 0,1 до 0,25), что позволит оценить характер изменения исходного параметра (рис. 2.5). Исходными данными являются параметры момента образования трещины: $k_{отб}$; D ; α . Угол конусности детали найдем из условия постоянства объема металла заготовки и детали в момент образования трещины:

$$V_{дет} = V_{заг},$$
$$F_{дет} S_{cp} = F_{заг} S_{заг}, \quad (2.11)$$

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

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

S_{cp} - средняя толщина детали, равная: $S_{cp} = \frac{S_{заг} + S_{кр}}{2}$.

Используем, кроме этого, геометрические соотношения (см. рис. 2.3):

$$F_{\text{дем}} = \pi \cdot \frac{D+d}{2} \cdot l, \quad l = \frac{D-d}{2 \sin \alpha}, \quad F_{\text{заг}} = \frac{\pi(D^2 - d_1^2)}{4}. \quad (2.12)$$

Тогда

$$\sin \alpha = \frac{\left[\left(\frac{D}{d_1} \right)^2 - \left(\frac{S_{\text{заг}}}{S_{\text{кр}}} \right)^4 \right] \left(1 + \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{заг}}} \right)}{2 \left[\left(\frac{D}{d_1} \right)^2 - 1 \right]}. \quad (2.13)$$

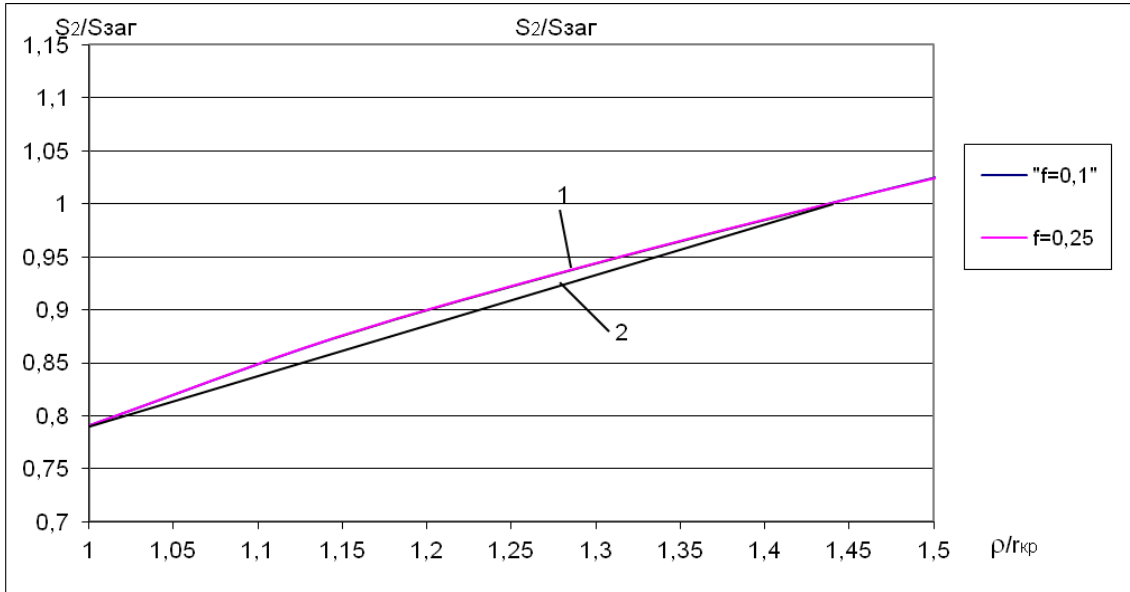


Рисунок 2.5 - График зависимости $S_2/S_{\text{заг}}$ от ρ/r
 ($k_{\text{отб}} = 1,6; D = 115 \text{ мм}; S_{\text{заг}}/S_{\text{кр}} = 1,28; \alpha = 34,7^\circ$):
 1 - расчетная кривая; 2 - априорная кривая

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 (2.11), геометрические соотношения:

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

определим относительную высоту:

$$\frac{H}{D} = \frac{\left[\left(\frac{D}{d_1} \right)^2 - 1 \right] \cos \{ \arcsin \alpha \}}{\left[\frac{D}{d_1} + \left(\frac{S_{\text{заг}}}{S_{\text{кр}}} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{заг}}} \right) \frac{D}{d_1}}. \quad (2.14)$$

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

$$\psi = e_{кр} = \frac{-F_0 + F}{F_0} = \frac{-\pi d_1 S_{заг} + \pi d S_{кр}}{\pi d_1 S_{заг}}. \quad (2.15)$$

Учитывая соотношения (2.1) и (2.15), имеем:

$$\psi = \sqrt{\frac{d}{d_1}} - 1 = \sqrt{k_{омб}} - 1. \quad (2.16)$$

Полученная зависимость позволяет найти предельный коэффициент отбортовки при условии $\psi = \psi_{ли}$:

$$k_{пред} \leq \frac{d}{d_1} = (\psi_{ли} + 1)^2.$$

На рис. 2.6 представлена графическая зависимость H/D от $S_{заг}/S_{кр}$ для конкретного материала МЗ при формообразовании за несколько операций с учетом механических свойств: $\delta_{ли} = 0,325$, $\psi_{ли} = 0,245$, $k_{пред} = 1,55$.

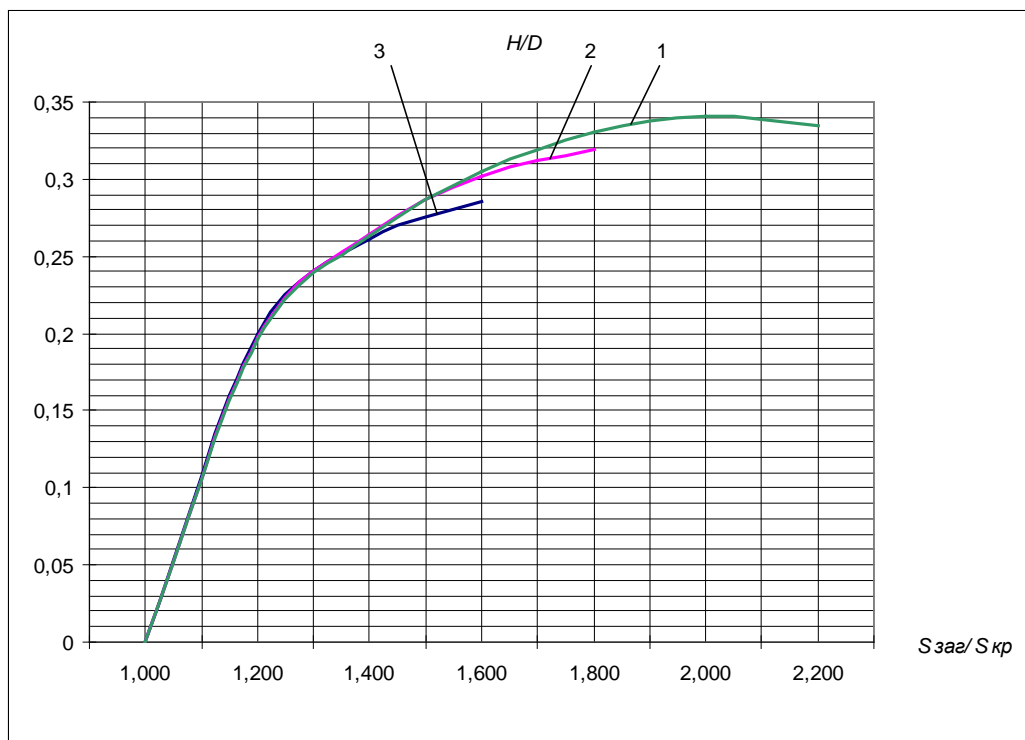


Рисунок 2.6 - График зависимости H/D от $S_{заг}/S_{кр}$:

1 - кривая при $D/d_1=5$ (4 операции); 2 - кривая при $D/d_1=4$ (3 операции); 3- кривая при $D/d_1=3$ (2 операции)

Построенные графики позволяют оценить возможность получения тонкостенных оболочек способом отбортовки при многократных операциях: когда отношение большего диаметра детали к диаметру отверстия заготовки $D/d_1 > 5$ и угол конусности $\alpha \approx 17^\circ$, относительная высота 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.

2.3 Определение пружинения при отбортовке

Технологические возможности, определяемые предельным значением коэффициента отбортовки, пружинением кромки большого торца, требуют значительных дополнительных трудозатрат: увеличения числа операций, в том числе термофиксации [18,49]. Определим по известным формулам пружинение кромки при отбортовке, когда схема напряженно-деформированного состояния близка к линейной: ($\sigma_s \approx \sigma_\rho = 0, \sigma_\theta \neq 0, e_\rho = e_s, e_\theta = -2e_\rho = -2e_s$).

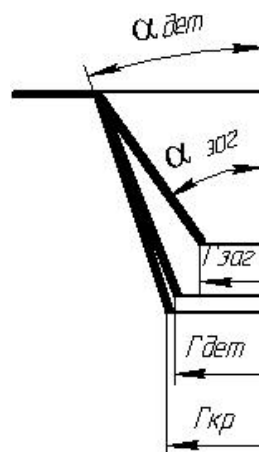


Рисунок 2.7 - Схема определения пружинения в процессе отбортовки

Известно, что величина упругой деформации

$$e_{упр} = \frac{\sigma_{иккромк}}{E}, \quad (2.17)$$

где $\sigma_{иккромк} = \sigma_{ТО} + \Pi e_{\theta_{иккромки}} = \sigma_{ТО} + \Pi \ln \left| \frac{r_{кромки}}{r_{заг}} \right|,$

$\sigma_{иккромк}$ - 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

$$e_{упр} = \ln \left| \frac{r_{дет}}{r_{кромки}} \right|, \quad (2.18)$$

где $r_{дет}$ - радиус детали.

Следовательно, радиус детали из равенства формул (2.17) и (2.18):

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

Разница в радиусах составит:

$$\Delta r = r_{кромки} - r_{дет} = r_{кромки} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{иккромк}}{E}\right) \right]. \quad (2.19)$$

Надо иметь в виду, что для кромки при отбортовке $\sigma_{иккромк} = \sigma_{\theta_{кромки}}$.

Детали, полученные предлагаемым способом, обладают разнотолщиной, пружинением. Их часто подвергают механической обработке, что приводит к значительному припуску по толщине.

2.4 Исследование способа формообразования из кольцевой заготовки с использованием процессов отбортовки и формовки

Для реализации этого способа необходимо установить границы перехода процесса формовки в отбортовку и наоборот [22]. Процесс формовки реа-

лизуется в том случае, когда напряжение отбортовки больше или равно напряжению формовки в зоне перехода отформованного конического участка в плоскую донную часть (далее - зона перехода). Уравнение равновесия в полярной системе координат [57] для рассматриваемого случая формообразования заготовки при $f = 0$ и $R_p \rightarrow \infty$ примет вид

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0. \quad (2.20)$$

Запишем условие пластичности: $\sigma_\theta = \sigma_s$.

С учетом граничных условий $\sigma_\rho = 0$; $\rho = r_{кр}$ получим напряжение при отбортовке [49]:

$$\sigma_\rho^{отб} = \sigma_s \left(1 - \frac{r_{кр}}{R_\sigma} \right), \quad (2.21)$$

где $S_{заг}$ - толщина заготовки;

σ_s - напряжение текучести;

R_σ - радиус цилиндрической поверхности на границе наружного и внутреннего пуансонов;

$r_{кр}$ - радиус кромки.

В выражении (2.21) напряжение текучести учитывает упрочнение при условии, что интенсивность деформаций всех элементов донной части заготовки, которые отбортовываются, одинакова.

Для обеспечения реализации процессов формовки и отбортовки за один переход необходимо определить соотношение r_0 / R_σ геометрических параметров заготовки после формовки, угол θ охвата заготовкой радиуса пуансона при заданном соотношении r / R геометрических параметров детали (рис. 2.8).

Для решения поставленной задачи необходимо выполнение следующих условий:

1. На 1-й стадии процесса, т.е. при формовке, желательно выдержать соотношение $\frac{r_{кр} - r_0}{r_0} \leq \varepsilon$, где ε - деформация кромки на 1 стадии ($\varepsilon < \delta_p$).

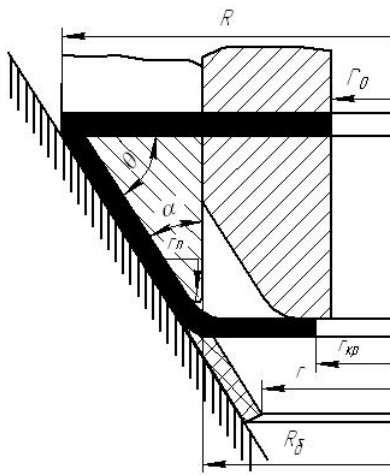


Рисунок 2.8 - Схема процесса формовки и отбортовки:

R - радиус большого основания детали; r - радиус меньшего основания детали, полученной формовкой; $R_с$ - радиус цилиндрической поверхности на границе наружного и внутреннего пуансонов; $r_{кр}$ - радиус кромки; $r_н$ - радиус закругления пуансона; r_0 - радиус отверстия в заготовке; θ - угол охвата заготовкой радиуса пуансона; α - угол конусности

2. На 2^{-й} стадии процесса, т.е. при отбортовке, предельные условия деформирования определяются выражением [49]

$$e_{\theta_{кр}} = \frac{r - r_0}{r_0} \leq \delta_p, \quad (2.22)$$

где $e_{\theta_{кр}}$ - тангенциальная деформация кромки;

δ_p - равномерное удлинение.

Из последнего выражения находим радиус отверстия:

$$r_0 = \frac{r}{\delta_p + 1}. \quad (2.23)$$

В формуле (2.21) будем считать: $\sigma_s = \sigma_{T_0} + \Pi e_\theta$,

$$r_{кр} = (1 + \varepsilon) r_0, \quad (2.24)$$

где $e_\theta = e_i \approx \varepsilon$;

e_i - интенсивность деформаций, равная максимальной тангенциальной деформации;

Π - модуль упрочнения, равный:

$$\Pi = \frac{\sigma_{T_0}}{1 - \delta_p}; \quad (2.25)$$

σ_{T_0} - экстраполированный предел текучести.

С учетом формул (2.24) ,(2.25) из выражения (2.21) получим:

$$\sigma_{\rho}^{отб} = \sigma_{T_0} \left(1 + \frac{\varepsilon}{1 - \delta_p} \right) \left(1 - \frac{r_{кр}}{R_{\delta}} \right). \quad (2.26)$$

Когда выполняется условие $\sigma_{\rho}^{отб} = \bar{\sigma}_{\rho}^{форм}$ (где $\bar{\sigma}_{\rho}^{форм}$ - напряжения формовки в зоне отбортовки с учетом изгиба и трения по радиусу пуансона), процесс формовки заканчивается и начинается процесс отбортовки.

В данной формуле неизвестным является $\sigma_{\rho}^{отб}$ и θ - угол охвата заготовкой радиуса пуансона, остальные параметры берутся либо конструктивно, либо из параметров механических свойств.

В момент окончания формовки и начала активной отбортовки:

$$\sigma_{\rho}^{форм} = \sigma_{T_0} + \Pi \left(\frac{S_{заг} - S_{дем}}{S_{заг}} \right), \quad (2.27)$$

где $S_{дем}$ - известное значение толщины.

$S_{заг}$ - толщина заготовки.

С учетом изгиба и трения формула (2.27) примет вид

$$\bar{\sigma}_{\rho}^{форм} = \left\{ \left[\sigma_{T_0} + \Pi \left(\frac{S_{заг} - S_{дем}}{S_{заг}} \right) \right] - \frac{\sigma_{T_0} + \Pi \left(\frac{S_{заг} - S_{дем}}{S_{заг}} \right)}{\frac{2r_n}{S_{заг}} + 1} \right\} / (1 + f \cdot \theta). \quad (2.28)$$

Отношение $S_{дем} / S_{заг}$ находим, считая, что толщина заготовки после формовки равна толщине, определяемой 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:

$$e_{\rho} + e_s + e_{\theta} = 0, e_s = -\frac{1}{2} e_{\theta} = -\frac{1}{2} \delta_p \text{ или } e_s = \frac{S_{дем} - S_{заг}}{S_{заг}} = -\frac{1}{2} \delta_p, \quad (2.29)$$

$$\frac{S_{дем}}{S_{заг}} = 1 - 0,5\delta_p.$$

Тогда формулу (2.27) запишем в следующем виде:

$$\sigma_{\rho}^{отб} = \sigma_{\rho}^{форм} = \sigma_{T_0} + 0,5\Pi\delta_p = \sigma_{T_0} + 0,5\delta_p \frac{\sigma_{T_0}}{1 - \delta_p}. \quad (2.30)$$

Приравняв выражения (2.26) и (2.28) с учетом формул (2.29), после преобразования получим:

$$\frac{r_0}{R_\sigma} = \frac{1}{1 + \varepsilon} - \frac{2(1 - 0,5\delta_\rho) \frac{r_n}{S_{заг}}}{\left(\frac{2r_n}{S_{заг}} + 1\right)(1 + \varepsilon)(1 + f \cdot \theta)(1 + \varepsilon - \delta_\rho)}. \quad (2.31)$$

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

$$\begin{aligned} V_{дет} &= V_{заг}, \\ F_{дет} S_{дет} &= F_{заг} S_{заг}, \end{aligned} \quad (2.32)$$

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

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

Запишем равенство (2.32) с учетом обозначений (см. рис. 2.8):

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

С учетом отношений (2.23) и (2.29) находим:

$$\cos \theta = \frac{\frac{(1 - 0,5\delta_\rho)}{2} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \frac{1}{(1 + \delta_\rho)^2}}. \quad (2.33)$$

Определив по формулам (2.33), (2.26) значения θ и $\sigma_\rho^{омб}$ при заданных геометрических значениях детали r/R и механических свойств материала δ_ρ , получим условие последовательного максимально возможного деформирования заготовки по схеме формовка-отбортовка для изготовления конической оболочки. Оно определяется геометрическим соотношением r_0/R_σ и позволя-

ет установить высоту конической детали. На рис. 2.9 в качестве примера приведены результаты расчета для материала: сталь 12X18H10T.

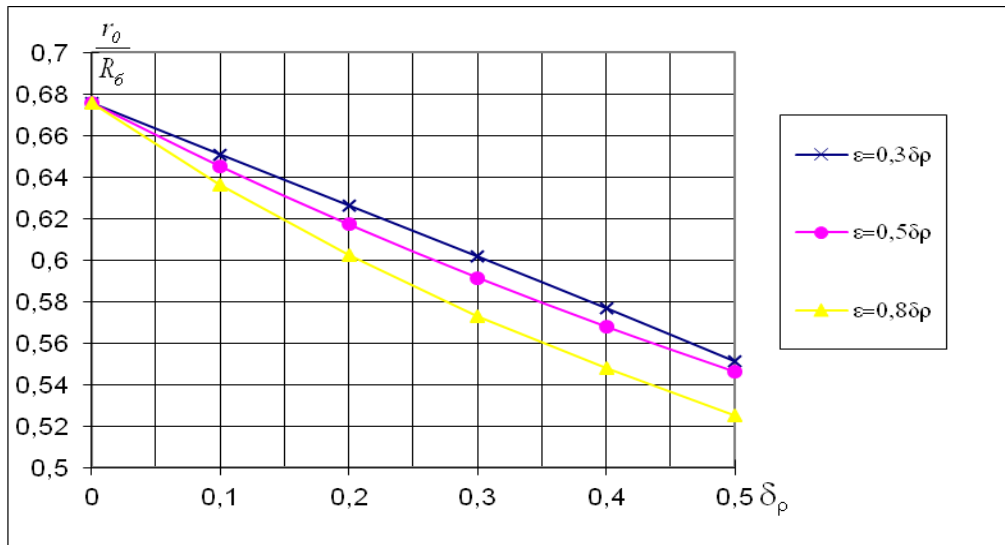


Рисунок 2.9 - Зависимость отношения r_0/R_δ от δ_p при $r/R=0,3$; $r_n/S_{заз}=0,3$; коэффициент трения $f=0,15$

Для интенсификации процесса и получения глубоких конических деталей следует уменьшить соотношение r_0/R_δ и увеличить угол θ . Однако основным ограничением является показатель пластических свойств материала δ_p . Анализ формул (2.26), (2.33) показывает, что с увеличением δ_p увеличивается угол θ и уменьшается отношение r_0/R_δ . Это позволяет получить более высокие конические детали, их высота зависит от утонения заготовки.

3 Способы получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы из конической заготовки с использованием процесса формовки

Рассматриваемые способы характеризуются схемами растяжения на поверхности листа не только по напряжениям, но и по деформациям, когда формообразование происходит за счет увеличения площади заготовки из-за ее утонения.

Заявленный способ, основанный на процессах отбортовки-формовки [2] из сварной листовой заготовки, считался одним из наиболее перспективных (рис. 3.1) для получения тонкостенных осесимметричных изделий. С его помощью появилась возможность добиться 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.

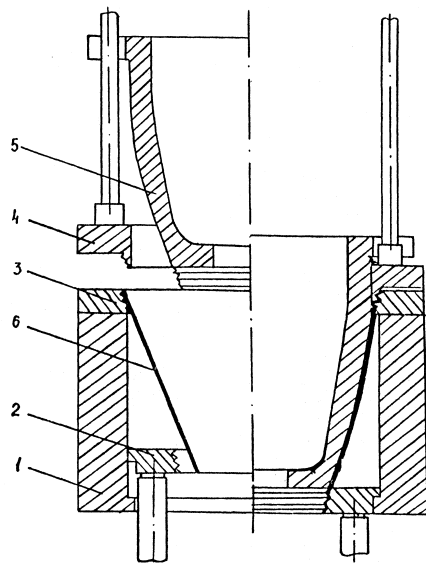


Рисунок 3.1 - Способ штамповки отбортовки – формовки
(А.с. 1748905 СССР № 4760202):

1 - подкладная плита; 2 - выталкиватель; 3 - матрица; 4 - прижим; 5 - пуансон; 6 - заготовка

Оснастка, изображенная на рис. 3.1, 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 формирующего 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 качеству. Поверхность инструмента в местах зажима заготовки имеет шероховатость в виде мелкой насечки.

Задача получения деталей выпуклой формы может быть решена иначе [46].

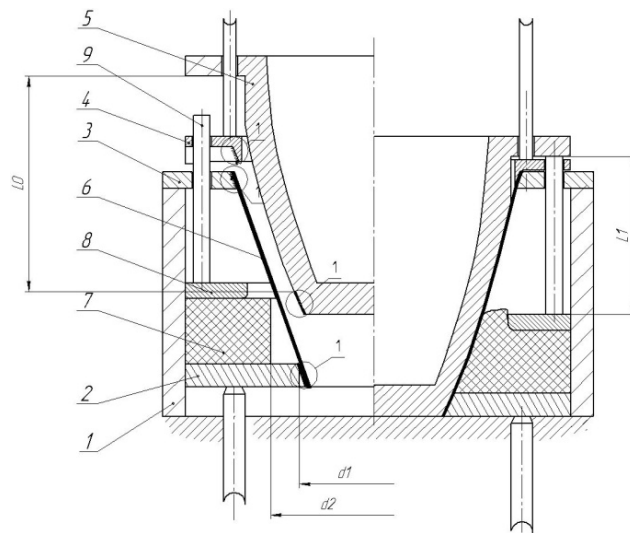


Рисунок 3.2 - Устройство для формообразования оболочек сужающейся формы (Патент 58055- 2006117037/22):

1 - подкладная плита; 2 - выталкиватель; 3 - матрица; 4 - прижим; 5 - пуансон; 6 - заготовка; 7 - эластичный элемент; 8 - толкатель; 9 – шпилька

В сравнении с предыдущим способом предложено использование эластичного элемента в зоне малого диаметра, который блокирует опасное сече-

ние силами трения, тем самым расширяя возможности формообразования. Целесообразно применение для оболочек сильно сужающейся формы (с большой разницей между большим и малым диаметрами).

Устройство состоит (рис. 3.2) 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.

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 деформирования 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 L_1 несколько больше, чем длина рабочей части пу-

ансона 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. Увеличиваются растяжение и утонение элементов заготовки, примыкающих к большому основанию, в результате чего равномерность толщины стенки штампованной детали значительно повышается.

Важным фактором является согласование необходимого сжатия эластичного элемента и перемещений пуансона и толкателей. Надо отметить, что в приведенных способах процесс отбортовки нецелесообразен, так как он усложняет возможность достижения равномерной толщины детали. При этом важным фактором в рассматриваемых способах является трение [7,15,17,27,33,61]. В источниках [14,55] приведена величина коэффициента трения со смазкой и без смазки

Таблица 3.1. 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 [41] проведены эксперименты и определен коэффициент трения при различных условиях трения на поверхности контакта нержавеющей и инструментальной стали. Полученные результаты представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Значения коэффициентов трения на поверхности контакта нержавеющей 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

С технической и экономической точек зрения очень важно проектировать технологический процесс так, чтобы он направленно изменял толщину заготовки [19,51]. Для достижения поставленной цели предлагается усовершенствованное устройство, обладающее большими возможностями и более простым механизмом формообразования тонкостенных осесимметричных деталей с использованием процесса формовки [42]. На рис. 3.3 и 3.4 показаны устройства для промышленного производства соответственно вогнутых и выпуклых тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы (слева от оси в открытом, а справа от оси в закрытом положении) [21,22,47].

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, размещенный 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 се-

чения 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. Большой диаметр эластичного элемента равен внутреннему диаметру матрицы, а меньший диаметр равен диаметру выталкивателя.

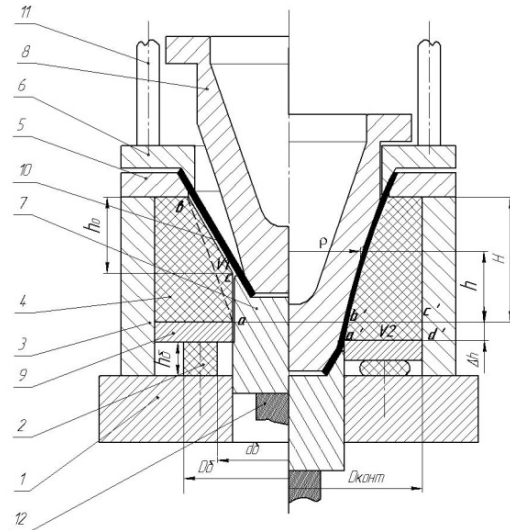


Рисунок 3.3 - Устройство для формообразования тонкостенных усеченных сужающихся оболочек:

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

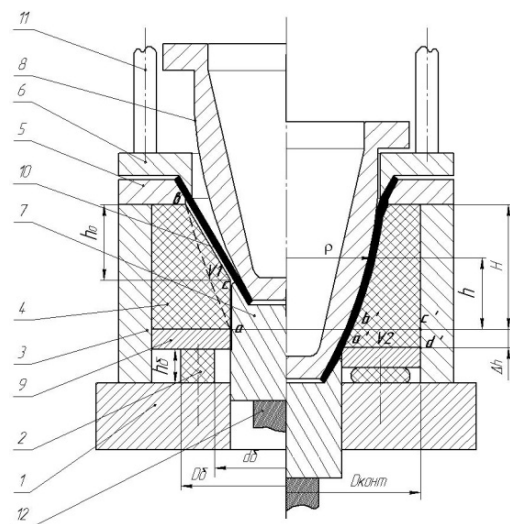


Рисунок 3.4 - Устройство для формообразования тонкостенных усеченных сужающихся оболочек (Патент 102543 - 2010140398):

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

Заготовка в виде усечённого конуса устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 5, а прилегающие 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 надёжно 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 прессы. 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_r , уменьшая их в зоне наименьшего диаметра и увеличивая в зоне наибольшего диаметра. Создав их преобладающее влияние, возможно получить минимальную разнотолщинность. К недостаткам процесса относится использование больших усилий.

Предлагается устройство, позволяющее получить деталь с достаточно равномерным распределением толщины, механических свойств вдоль образующей, высокой точностью геометрических размеров, в том числе и по толщине заготовки, что облегчает компоновку деталей, например в двигателях ЛА, повышает коэффициент использования материала и сокращает расход металла при проектировании технологических процессов (рис. 3.5). Коническая полая заготовка 10 устанавливается в устройство и фиксируется за большой торец между рабочей матрицей 5 и верхним плоским прижимом 4. При рабочем ходе пуансона 2 осуществляется деформирование путём отбортовки и формовки (осевого растяжения). Деформируемая заготовка не перемещается, поскольку она зафиксирована за большой торец. На I стадии идет процесс отбортовки, пока заготовка не будет зажата между пуансоном 2 и эластичным элементом 7. Усилие от пуансона передается на эластичный элемент 7, деформируя его и прижимая заготовку, состояние которой определено схемой напряженно-деформированного состояния, соответствующего процессу формовки. При этом заготовка удлиняется вдоль образующей, компенсируя укорачивание при отбортовке на I стадии. Возникающие в результате силы трения на поверхностях заготовка-пуансон и заготовка-эластичный элемент создают меридиональные напряжения, которые способствуют условиям, позволяющим с высокой точностью получать внутреннюю поверхность детали по рабочей поверхности пуансона. При такой схеме практически отсутствует пружинение.

Усилие растяжения нижним прижимом можно определить:

$$P_{np} = 2\pi q \frac{R^2 - r^2}{2 \sin \alpha} \frac{\sigma_\epsilon}{2q} f. \quad (3.1)$$

Оно не должно превышать усилия разрыва по сечению с радиусом R :

$$P_p = 2\pi R \sigma_\epsilon S. \quad (3.2)$$

Приравняв (3.1) и (3.2), находим:

$$r = \frac{\sigma_\epsilon S \sin \alpha}{2q f} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{\sigma_\epsilon \sin \alpha}{2q \cdot f} \right)^2}, \quad (3.3)$$

где σ_e - предел прочности заготовки;

S - толщина заготовки;

α - угол конусности эластичного элемента;

q - давление эластичного элемента;

f - коэффициент трения между заготовкой и эластичным элементом;

R - радиус большего торца детали;

r - радиус меньшего торца детали.

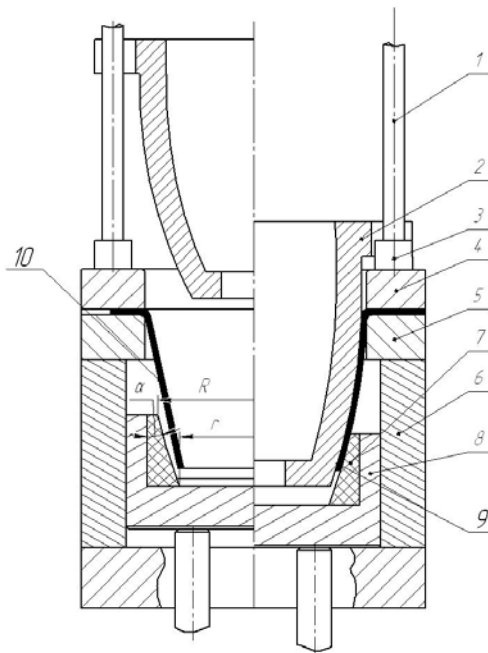


Рисунок 3.5 - Устройство для формообразования тонкостенных усеченных сужающихся оболочек:

1- шпилька; 2- пуансон; 3 - стакан; 4- верхний плоский прижим; 5 - матрица; 6 - опорное кольцо; 7 - эластичный элемент в виде кольца; 8 - нижний прижим; 9 - деталь; 10 - заготовка

Получить равномерную толщину детали возможно при наличии активных сил трения и выполнив условие [52]:

$$\iint_F (S_T - S_{зад})^2 dF \rightarrow \min, \quad (3.4)$$

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

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

F - площадь детали по срединной поверхности.

Используя аналитическую зависимость (3.4), условие для осесимметричной детали может быть представлено как:

$$\int_l (S_T - S_{зад})^2 dl \rightarrow \min, \quad (3.5)$$

где l - длина образующей детали.

Выражение (3.5) является функционалом [30]. 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 (3.5) дает возможность увеличить КИМ, уменьшить трудоемкость и повысить эксплуатационные характеристики детали, что доказано в работах [4,51,52]. 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 $S_{зад} = S_{дем} = const$.

3.1 Анализ напряженно-деформированного состояния процесса формовки

3.1.1 Допущение о плоскодеформированном состоянии

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

а) Коническая деталь (рис. 3.6).

Основой расчета является постоянство объема металла заготовки и детали:

$$\begin{aligned} V_{заг} &= V_{дем}, \\ F_{заг} S_{заг} &= F_{дем} S_{дем}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

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

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

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

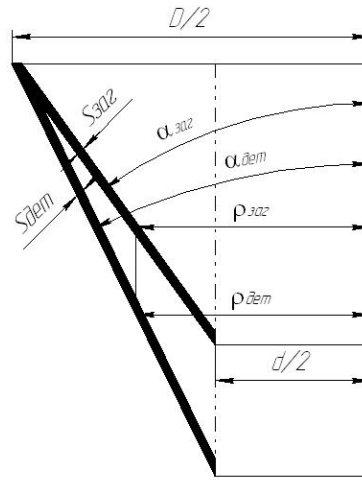


Рисунок 3.6 - Деталь конической формы:

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

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:

$$F_{заг} = \frac{\pi(D+d)}{2} \cdot \frac{D-d}{2 \sin \alpha_{заг}} = \frac{\pi(D^2-d^2)}{4 \sin \alpha_{заг}}. \quad (3.7)$$

Запишем (3.6) с учетом (3.7):

$$\frac{\pi(D^2-d^2)}{4 \sin \alpha_{заг}} S_{заг} = \frac{\pi(D^2-d^2)}{4 \sin \alpha_{дет}} S_{дет}. \quad (3.8)$$

Из соотношения (3.8) определим:

$$S_{дет} = S_{заг} \frac{\sin \alpha_{дет}}{\sin \alpha_{заг}}. \quad (3.9)$$

Условие постоянства объема запишем с учетом (3.9):

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

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 $\frac{R}{r} \leq 1,5 \div 2$ (рис. 3.7). 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.

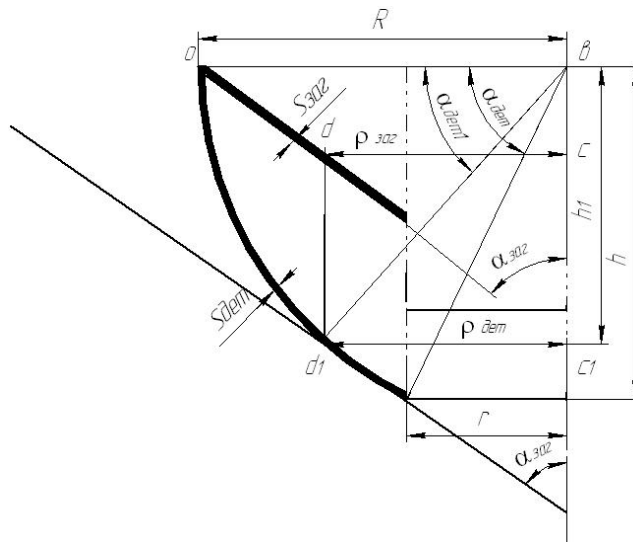


Рисунок 3.7 - Деталь шарообразной формы:

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 $\rho_{заг}$

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 определяются по известному значению толщины заготовки.

Определим из геометрических соотношений:

$$V_{заг} = \frac{2\pi(R+r)}{2} \cdot \frac{(R-r)}{\sin \alpha_{заг}} \cdot S_{заг} = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{\sin \alpha_{заг}} \cdot S_{заг}, \quad (3.10)$$

$$V_{дет} = 2\pi R h S_{дет},$$

при $h = R \sin \alpha_{дет}$

$$V_{дет} = 2\pi R^2 \sin \alpha_{дет} S_{дет}, \quad (3.11)$$

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

$V_{заг}$ - объем заготовки.

Приравняв выражения (3.10) и (3.11), определим толщину детали:

$$S_{дет} = \frac{(R^2 - r^2)}{2 \sin \alpha_{заг} R^2 \sin \alpha_{дет}} \cdot S_{заг}. \quad (3.12)$$

Рассматривая предельный случай формовки из конической заготовки в деталь сферической формы, мы имеем величину максимального утонения за-

готовки $\frac{S_{заг}}{S_{дет}} = 2$ независимо от отношения $\frac{r}{R}$. Действительно, исходя из гео-

метрических соотношений и зависимости (3.12) 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 $V_{\rho_{заг}} = V_{obcd}$:

$$V_{\rho_{заг}} = \frac{\pi(R^2 - \rho_{заг}^2)}{\sin \alpha_{заг}} \cdot S_{заг}, \quad (3.13)$$

где ρ - текущий радиус.

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

$$V_{\rho_{дем}} = 2\pi R^2 S_{дем} \sin \alpha_{дем1}. \quad (3.14)$$

Используем зависимости:

$$h_1 = \sqrt{R^2 - \rho_{дем}^2},$$

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

Приравняв объемы (3.13) и (3.14), находим связь между $\rho_{заг}$ и $\rho_{дем}$:

$$\rho_{заг} = \sqrt{R^2 - \sqrt{(R^2 - r^2)(R^2 - \rho_{дем}^2)}}. \quad (3.15)$$

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

$$\xi = \frac{\rho_{дем} - \rho_{заг}}{\rho_{дем}}. \quad (3.16)$$

Подставив (3.15) в (3.16), получим:

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

где $x = \frac{\rho_{дем}}{R}$,

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

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

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

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 в два раза 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 (рис. 3.8).

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

$$\rho_{заг} = \sqrt{r^2 + \frac{(2\pi R_0 \cdot r \alpha_{дем1} - 2r^2 \sin \alpha_{дем1})}{2\pi R_0 \cdot r \alpha_{дем} - 2r^2 \sin \alpha_{дем}}}$$

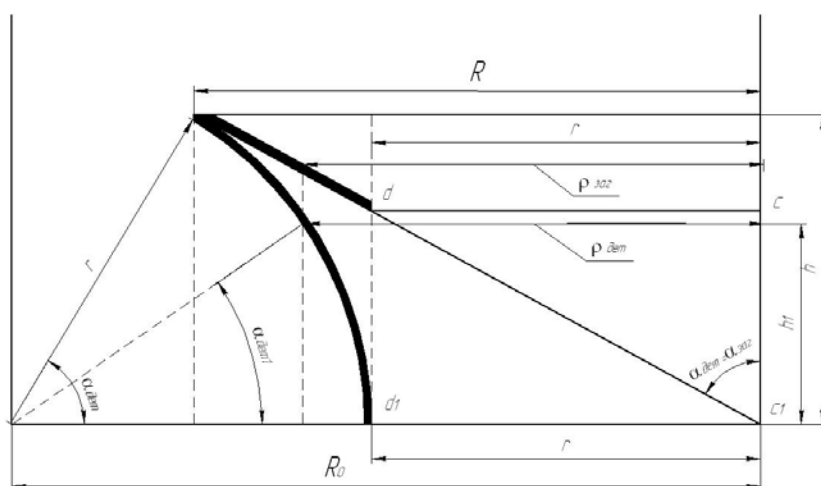


Рисунок 3.8 - Деталь вогнутой формы:

$\alpha_{дем1}$ - 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 $\alpha_{дем1}$ от ζ (рис. 3.9).

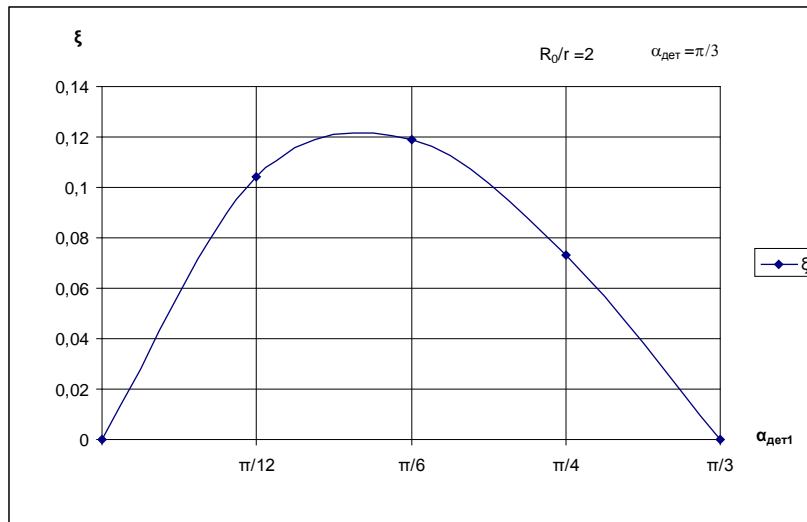


Рисунок 3.9 - Оценка погрешности между координатами

Мы видим, что при значениях, близких к $\pi/6$, 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 [20].

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:

$$e_{\theta} \approx 0. \quad (3.17)$$

В таком случае принимаем схему плоскодеформированного состояния, когда деформации по толщине равны и противоположны по знаку меридиональным деформациям. Из условия постоянства объема, с учетом (3.17) получаем:

$$e_{\rho} = -e_s. \quad (3.18)$$

3.1.2 Учет упрочнения

Упрочнение металла представляется в виде линейной функции [23,24,38,40]. Эта зависимость достаточно точна, если исходить из того, что

величина накопленной деформации была близка к реальной на заданном интервале деформирования [24]:

$$\sigma_S = \sigma_{T_0} + \Pi e_i, \quad (3.19)$$

где e_i - интенсивность деформаций на рассматриваемом интервале деформирования;

Π - модуль упрочнения;

σ_S - напряжение текучести;

σ_{T_0} - экстраполированный предел текучести.

Константы упрочнения линейной зависимости определяются следующим образом: постоянные значения σ_{T_0} 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 [25,34,35]:

$$\sigma_S = Ae_i^n, \quad (3.20)$$

где константы упрочнений штампуемого материала вычисляются по формулам:

$$n = \frac{\ln \left| \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{ш}} \right|}{\ln \left| \frac{0,002}{\delta_p} \right|}, \quad (3.21)$$

$$A = \frac{\sigma_{ш}}{\delta_p^n}, \quad (3.22)$$

где напряжения в момент появления шейки равны:

$$\sigma_{ш} = \sigma_{\epsilon} \left(1 + \delta_p \right). \quad (3.23)$$

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

С учетом сказанного условие минимизации определим, используя метод наименьших квадратов [31]:

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

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

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

$$\Pi = \frac{-\sigma_{0,2} \int_m^d e_i d e_i + A \int_m^d e_i^{n+1} d e_i}{\int_m^d e_i^2 d e_i - 0,002 \frac{e_i^2}{2}} , \quad (3.24)$$

$$\sigma_{T_0} = \sigma_{0,2} - \Pi \cdot 0,002 . \quad (3.25)$$

3.1.3 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 [60], выражено через параметры σ_p и S_T . Наиболее просто такую зависимость можно представить в виде функции

$$q = k \sigma_p S_T , \quad (3.26)$$

где k - коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента;

σ_p - напряжения в меридиональном направлении;

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

3.1.4 Определение напряжений, деформаций, усилия и давления процесса

Используя инженерный метод решения для получения деталей с минимальной разнотолщинностью, выполняем условие (3.4). Для решения функционала необходимо найти технологическую толщину S_T с учетом принятых допущений. Минимизацию выражения (3.4) 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 [10,13,59]. При решении инженерным методом уравнение равновесия в полярной системе координат для случая формообразования заготовки в заключительной стадии процесса с использованием эластичного элемента примет вид [50,60]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{f\rho}{\sin \alpha} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{q \left(1 - \frac{f_1}{f} \right)}{S_T} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (3.27)$$

где q - давление, создаваемое эластичным элементом;

R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении;

R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении;

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 [9,10,13] при условии (3.14) имеем:

$$\sigma_\theta = \mu\sigma_\rho. \quad (3.28)$$

Для трансверсально-изотропного тела в случае плоскодеформированного состояния, когда тангенциальные деформации равны нулю $e_\theta \approx 0$, а деформации по толщине равны и противоположны по знаку меридиональным деформациям (3.18) [57], с учетом условия (3.28) и условия постоянства объема [10,11,13,57]:

$$e_i = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}} |e_s|, \quad (3.29)$$

$$\sigma_s = \sigma_\rho \sqrt{1-\mu^2}, \quad (3.30)$$

где e_s - деформация по толщине.

Примем в первом приближении:

$$e_s = \ln \left| \frac{S_{заг}}{S_{дет}} \right| \approx \frac{S_{заг} - S_T}{S_{заг}}. \quad (3.31)$$

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

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} |e_s|, \quad (3.32)$$

$$\sigma_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_\rho. \quad (3.33)$$

Рассмотрим случай формовки детали выпуклой формы (рис. 3.10).

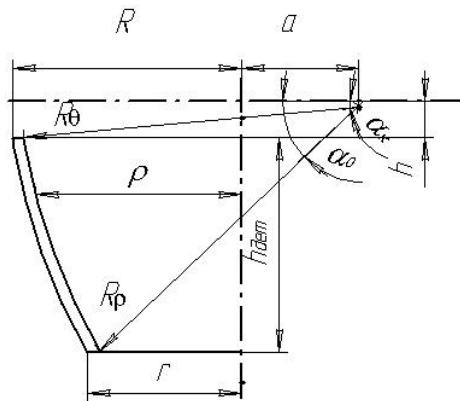


Рисунок 3.10 - Деталь выпуклой формы:

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

Согласно рис. 3.10 из геометрических соотношений:

$$R_\theta = \frac{\rho}{\cos \alpha_0}, \quad (3.34)$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{h_{дет} + h}{R_\rho}, \quad (3.35)$$

$$\cos \alpha_0 = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0}, \quad (3.36)$$

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;

α_k - угол, образованный радиусом R_ρ , проведенным к кромке детали большего основания, и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали.

Учитывая выражения (3.26) и (3.34), уравнение равновесия (3.27) при использовании эластичного элемента примет вид

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

где \pm - знаки, определяющие форму детали.

Разделим переменные:

$$\frac{d\sigma_\rho}{\sigma_\rho} = -\frac{(1-\mu)}{\rho} d\rho + \frac{f}{\sin \alpha} \left(k \left(1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm \frac{1}{R_\rho} \right) d\rho + \frac{f\mu \operatorname{ctg} \alpha \cdot d\rho}{\rho}. \quad (3.37)$$

Проинтегрируем выражение (3.37), приняв согласно теореме о среднем [30]:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{R-r}{h_{dem}} \right), \quad (3.38)$$

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

Найдя произвольную постоянную интегрирования, определенную из граничного условия, согласно которому при $\rho = r$ напряжение $\sigma_\rho = \sigma_\rho^*$, уравнение (3.37) примет вид

$$\ln \left| \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\rho^*} \right| = \ln \left| \frac{\rho}{r} \right|^{\mu-1} + f\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \left| \frac{\rho}{r} \right| + \frac{f}{\sin \alpha} \left(\frac{k \left(1 - \frac{f_1}{f} \right)}{\frac{1}{R_\rho}} \pm 1 \right) \frac{r}{R_\rho} \left(\frac{\rho}{r} - 1 \right). \quad (3.39)$$

Для плоскодеформированного состояния при граничном условии, когда $\sigma_\rho = \sigma_\rho^*$, $S_T = S_{dem}$, величину σ_ρ^* находим по известному значению толщины

детали и найденной толщине заготовки, используя зависимости кривой упрочнения линейного типа (3.19), (3.30), (3.31):

$$\sigma_{\rho}^* = \frac{\sigma_{T_0}}{\sqrt{1-\mu^2}} + \frac{\Pi}{1-\mu^2} \left(\frac{S_{заг} - S_{дем}}{S_{заг}} \right), \quad (3.40)$$

где $S_{заг}$, $S_{дем}$ - известные значения толщин.

Введем безразмерные величины $S_{дем}' = \frac{S_{дем}}{R_{\rho}}$, $r' = \frac{r}{R_{\rho}}$, $\rho' = \frac{\rho}{R_{\rho}}$ и преобразуем

выражение (3.39):

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

$$\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\rho}^*} \cdot \left(\frac{\rho}{r} \right)^{1-\mu-fctg\alpha\mu} = \exp \left[\frac{f}{\sin \alpha} \left(k \left(1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) r \left(\frac{\rho'}{r'} - 1 \right) \right]. \quad (3.41)$$

Разложим правую часть выражения относительно нуля, а левую относительно единицы [60]:

$$\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\rho}^*} \left[1 + (\mu - 1 + fctg\alpha\mu) \left(\frac{\rho'}{r'} - 1 \right) \right] = 1 + \frac{fr}{\sin \alpha} \left(k \left(1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) \left(\frac{\rho'}{r'} - 1 \right). \quad (3.42)$$

Для преобразования последнего выражения введем обозначения:

$$A = 1 - \mu - f\mu \cdot ctg\alpha, \quad (3.43)$$

$$B = \frac{r \cdot f}{\sin \alpha}, \quad (3.44)$$

$$x = \left(\frac{\rho'}{r'} - 1 \right). \quad (3.45)$$

С учетом этого выражение (3.42) примет вид

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\rho}^* \frac{1 + B \left(k \left(1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) x}{1 + Ax}. \quad (3.46)$$

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

$$\sigma_{\rho} \sqrt{1-\mu^2} = \sigma_{T_0} + \Pi \frac{S_{заг} - S_T}{S_{заг}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}}. \quad (3.47)$$

Определим технологическую толщину S_T из (3.47):

$$S_T = S_{заг} \left(1 - \frac{\sigma_{\rho}}{\Pi} (1-\mu^2) + \frac{\sigma_{T_0}}{\Pi} \sqrt{1-\mu^2} \right).$$

С учетом (3.46):

$$S_T = S_{заг} \left[\frac{\sigma_{T_0} \sqrt{1-\mu^2}}{\Pi} + 1 - \frac{\sigma_{\rho}^* (1-\mu^2)}{\Pi} \left[\frac{1 + B \left(R_{\rho} k \left(1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) x}{1 + Ax} \right] \right], \quad (3.48)$$

где \pm - знак, определяющий форму детали:

+ - выпуклая форма;

- - вогнутая форма.

Выполняя условие (3.5) для осесимметричной задачи (заменяв переменную l на x), подставим в него полученное выражение (3.45):

$$\int_0^{x_0} \left(S_{заг} \left[\frac{\sigma_{T_0} \sqrt{1-\mu^2}}{\Pi} + 1 - \frac{\sigma_{\rho}^* (1-\mu^2)}{\Pi} \left[\frac{1 + B \left(R_{\rho} k \left(1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) x}{1 + Ax} \right] \right] - S_{дем} \right)^2 dx \rightarrow \min. \quad (3.49)$$

Здесь толщина $S_{дем}$ принимает значение $S_{зад}$. Проводим минимизацию функционала (3.5) по коэффициенту пропорциональности сжатия эластичного элемента k :

$$\frac{\partial}{\partial k} \int_0^{x_0} \left(S_{заг} \left[\frac{\sigma_{T_0} \sqrt{1-\mu^2}}{\Pi} + 1 - b - \frac{\sigma_{\rho}^* (1-\mu^2)}{\Pi} \left[\frac{1 + B \left(k R_{\rho} \left(1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) x}{1 + Ax} \right] \right] \right)^2 dx = 0, \quad (3.50)$$

где x_0 - граница интегрирования;

b - коэффициент утонения материала,

$$b = \frac{S_{дем}}{S_{заг}}. \quad (3.51)$$

Необходимо иметь в виду, что с учетом (3.51) условие (3.40) изменится:

$$\frac{\sigma_{\rho}^*(1-\mu^2)}{\Pi} = \frac{\sigma_{T_0} \sqrt{1-\mu^2}}{\Pi} + 1 - b. \quad (3.52)$$

Решение интеграла (3.50) при допустимой замене $\ln|Ax+1| \approx Ax$ преобразуется к виду

$$k = \frac{(1-\mu - f\mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha)x \cdot \sin \alpha \pm r' f}{r' \cdot R_{\rho}} \cdot \frac{1}{f - f_1}.$$

Дальнейший анализ проводился для случая, охватывающего наиболее часто встречающиеся варианты отношения $\frac{R}{r} \leq 2$. Тогда рассчитав по формуле (3.45), имеем $x=1$, т.е. границы интегрирования будут меняться от 0 до 1. После преобразований (3.50) получаем:

$$k = \frac{(1-\mu - f\mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \sin \alpha \pm r' f}{r' \cdot R_{\rho}} \cdot \frac{1}{f - f_1}, \quad (3.53)$$

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 (3.53) изменит свой вид:

$$k = \frac{1-\mu - \mu f \operatorname{ctg} \alpha}{r} \sin \alpha \cdot \frac{1}{f - f_1}. \quad (3.54)$$

В формулах (3.53) и (3.54) 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 (3.53) и (3.54) показал: подставив их в формулы (3.46), (3.48), 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 эксплуатационные характеристики.

Рассмотрим схему действия сил на верхнем прижиме (рис. 3.11).

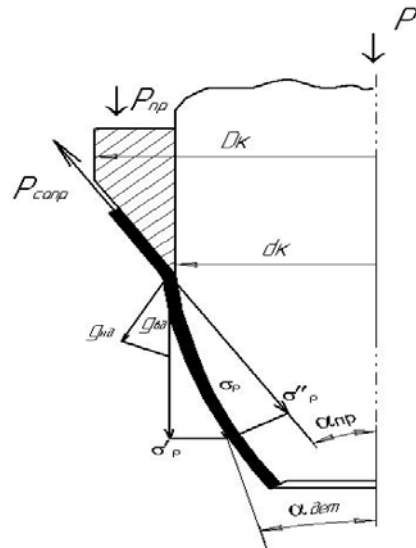


Рисунок 3.11 - Схема действия сил на верхнем прижиме:

P - усилие процесса формовки; P_{conp} - усилие сопротивления от прижима; P_{np} - усилие прижима; α_{det} - угол, образованный касательной, проведенной к образующей детали большего основания, и осью симметрии детали; σ_{ρ}^I - вертикальная составляющая напряжения в меридиональном направлении; σ_{ρ}^{II} - напряжение, определяющее величину тянущего усилия из зажимов заготовки; α_{np} - угол конусности заготовки; g_{no} - нормальная составляющая от давления прижима; g_{oo} - вертикальная составляющая от давления прижима; D_k - больший диаметр конуса; d_k - меньший диаметр конуса

Усилие процесса формовки деталей определяется:

$$P = \sigma_{\rho}^I \pi D S_{det}, \quad (3.55)$$

где D - диаметр большего основания детали.

Вертикальная составляющая напряжения в меридиональном направлении равна:

$$\sigma_{\rho}^I = \sigma_{\rho} \cos \alpha_{det}, \quad (3.56)$$

где σ_{ρ} - вычисляется по формуле (3.43);

$\alpha_{det} = \alpha_k$ - согласно рис. 3.10 для выпуклых деталей.

Усилие прижима выбирается из соображений того, чтобы заготовка не смогла из него выскользнуть. Чтобы определить усилие прижима P_{np} , необходимо составить уравнение равновесия между усилием сопротивления фланца заготовки, находящемся под прижимом P_{conp} , и тянущим усилием $P_{тян}$, дейст-

вующим в противоположном направлении вдоль образующей части заготовки, находящейся под прижимом:

$$P_{np} = g_{вд} F_{проекция}, \quad (3.57)$$

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

P_{np} - усилие прижима;

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

Из геометрических соображений:

$$F_{проекция} = \frac{\pi(D_k^2 - d_k^2)}{4}, \quad (3.58)$$

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

$$g_{нд} = \frac{P_{нпр}}{F_{кон}},$$

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

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

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

$$P_{нпр} = \frac{P_{тян}}{f}, \quad (3.59)$$

$$F_{кон} = \frac{\pi(D_k^2 - d_k^2)}{4 \sin \alpha_{np}}. \quad (3.60)$$

Тянущее усилие определяется:

$$P_{тян} = \sigma_{\rho}^{//} \pi D S_{дет}, \quad (3.61)$$

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

Подобные рассуждения применительно к нижнему зажиму приводят к выводу о вычислении по той же формуле, что и (3.57), но с учетом изменения тянущего усилия:

$$P_{тян} = \sigma_{\rho}^* \cos \alpha_{np} \cdot \pi d S_{дет}, \quad (3.62)$$

где d - меньший диаметр детали.

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

$$P = \sigma_{\rho}' \pi D S_{дет} + P_{эл}, \quad (3.63)$$

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

$$P_{эл} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} q, \quad (3.64)$$

где q - давление, создаваемое эластичным элементом (см. формулу 3.26).

Определим необходимое усилие для выбранного оборудования:

$$P_{обор} = 1,3P, \quad (3.65)$$

где P - усилие процесса формовки.

Из геометрических соображений определяется усилие эластичного буфера (см. рис. 3.3, 3.4):

$$P_{б} = \frac{\pi(D_{конт}^2 - d^2)}{4} q, \quad (3.66)$$

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

Рассмотрим далее границы применимости способа формовки с учетом использования эластичного элемента и без него. Условием отсутствия давления, создаваемого эластичным элементом, является равенство $k=0$.

3.2 Определение предельных параметров процесса формовки для получения тонкостенных осесимметричных деталей

3.2.1 Теоретическая оценка применимости процесса формовки с использованием эластичного элемента

С использованием формулы (3.53) 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 .

3.2.1.1 Формовка выпуклой детали

Расчеты проводились для случая формовки выпуклой детали из алюминиевой заготовки: высота детали $H = 25\text{мм}$, $R_p = 130,15\text{мм}$, $\alpha = 17^0$. Результаты в виде графиков представлены на рис. 3.12.

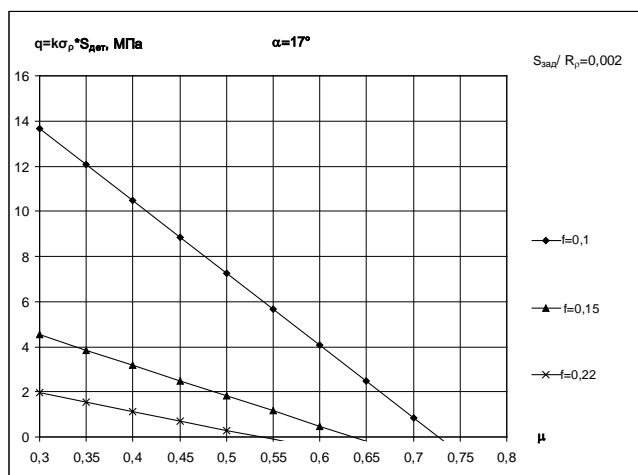


Рисунок 3.12 - Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 17^0$ для выпуклой детали, полученной из алюминиевого сплава при $S_{заг} / D = 0,00345$

Расчеты проводились для случая формовки выпуклой детали из алюминиевой заготовки при прочих равных условиях для $\alpha = 8,6^0$. Результаты в виде графиков представлены на рис. 3.13.

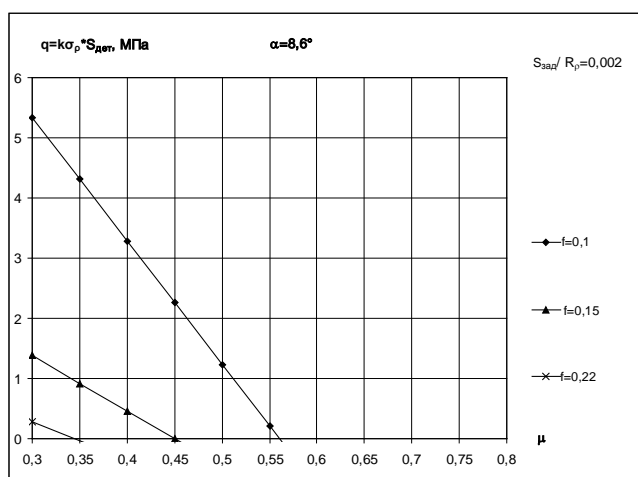


Рисунок 3.13 - Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 8,6^0$ для выпуклой детали, полученной из алюминиевого сплава при $S_{заг} / D = 0,00345$

Расчеты проводились для заготовки из меди: высота детали $H = 25\text{мм}$, $R_\rho = 130,125\text{мм}$, $\alpha = 16,5^0$. Результаты в виде графиков представлены на рис.3.14.

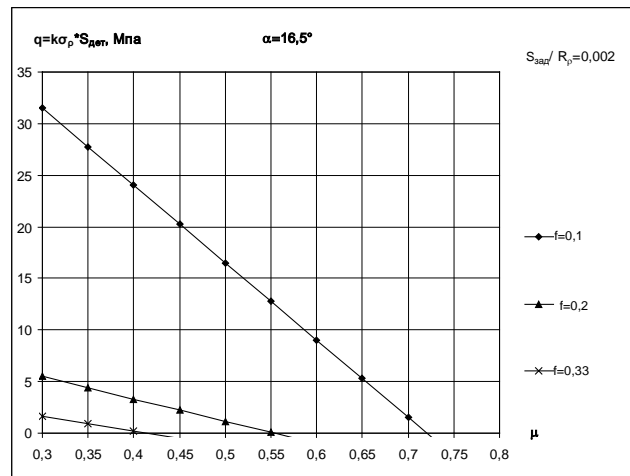


Рисунок 3.14 - Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 16,5^0$ для выпуклой детали, полученной из меди при $S_{заг} / D = 0,0029$

Расчеты проводились для заготовки из стали: высота детали $H = 25\text{мм}$, $R_\rho = 130,04\text{мм}$, $\alpha = 17,5^0$. Результаты в виде графиков представлены на рис.3.15.

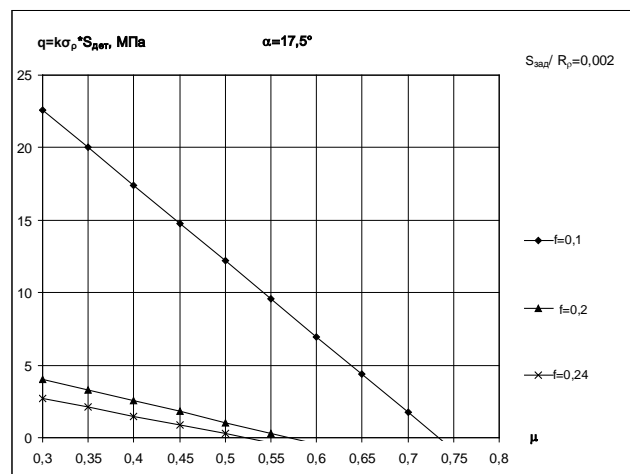


Рисунок 3.15 - Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 17,5^0$ для выпуклой детали, полученной из стали при $S_{заг} / D = 0,00095$

3.2.1.2 Формовка вогнутой детали

Для анализа, используя формулу (3.53), 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 рис. 3.16, 3.17, 3.18, 3.19.

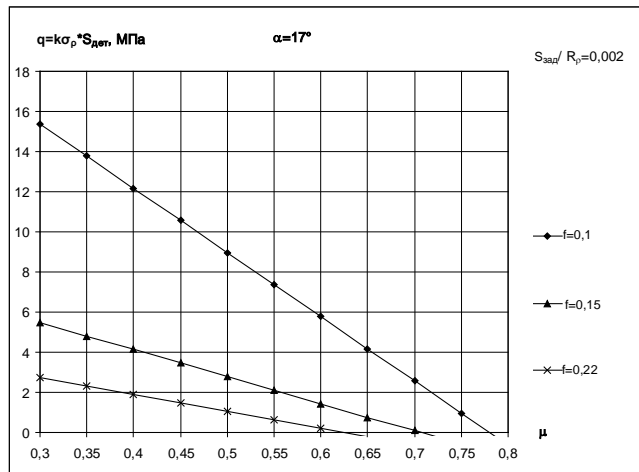


Рисунок 3.16 - Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 17^\circ$ для вогнутой детали, полученной из алюминиевого сплава при $S_{заг}/D = 0,00345$

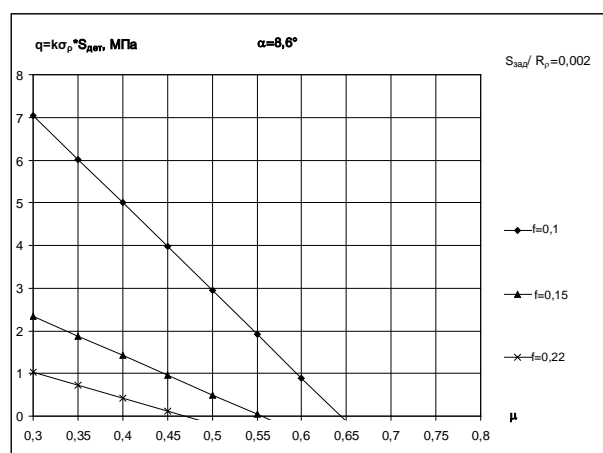


Рисунок 3.17 - Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 8,6^\circ$ для вогнутой детали из алюминиевого сплава при $S_{заг}/D = 0,00345$

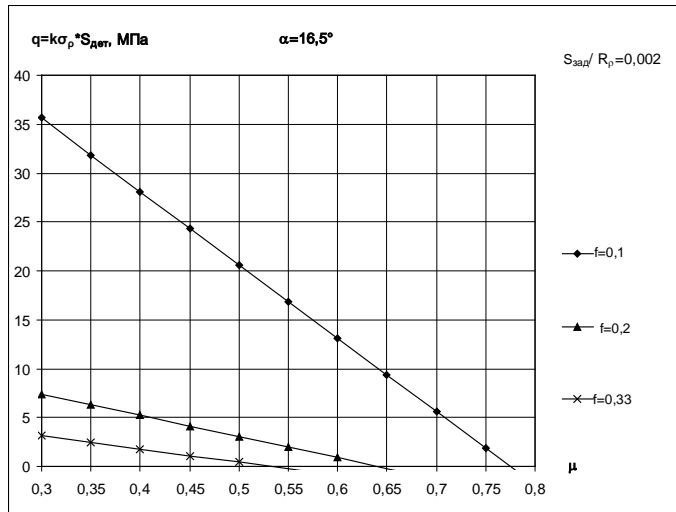


Рисунок 3.18 - Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 16,5^{\circ}$ для вогнутой детали, полученной из меди при $S_{зад} / D = 0,0029$

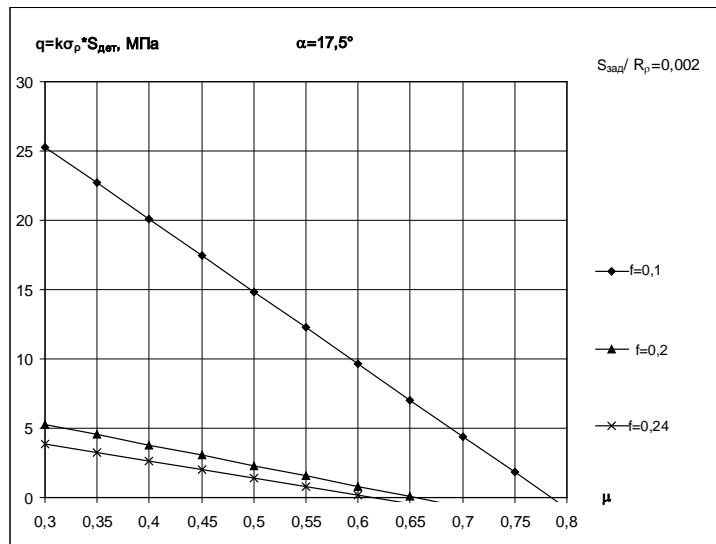


Рисунок 3.19 - Зависимость давления от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела при разных коэффициентах трения при угле $\alpha = 17,5^{\circ}$ для вогнутой детали, полученной из стали при $S_{зад} / D = 0,00095$

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 рис. 3.20, 3.21.

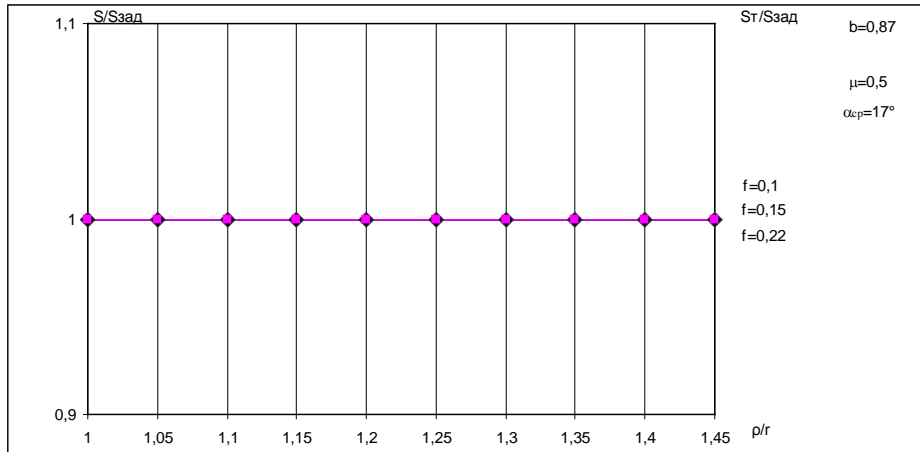


Рисунок 3.20 - Алюминиевый сплав, изменение $S_T / S_{зад}$ при увеличении отношения ρ / r , $\mu = 0,5$; $\alpha = 17^0$ для вогнутой детали

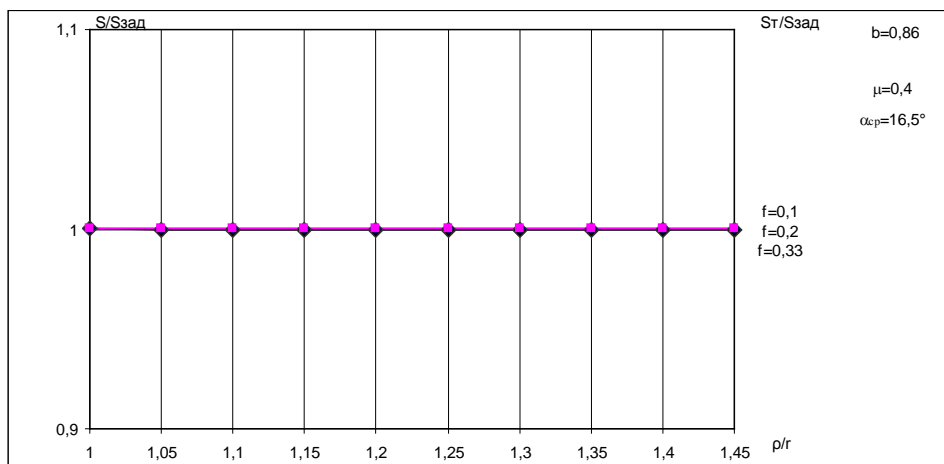


Рисунок 3.21 - Медь, изменение $S_T / S_{зад}$ при увеличении отношения ρ / r , $\mu = 0,4$; $\alpha = 16,5^0$ для вогнутой детали

3.2.1.3 Формовка вогнуто-выпуклой и выпукло-вогнутой детали

Согласно предложенной классификации 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 (рис. 3.22).

Запишем уравнение (3.53) для двух зон детали:

$$k_1 = \frac{(1 - \mu - f\mu \cdot \text{ctg} \alpha) \sin \alpha \pm r' f}{r' \cdot R_\rho} \cdot \frac{1}{f - f_1}, \quad (3.67)$$

$$k_2 = \frac{(1 - \mu - f\mu \cdot \text{ctg} \alpha) \sin \alpha \mp r' f}{r' \cdot R_\rho} \cdot \frac{1}{f - f_1}, \quad (3.68)$$

где $r_1' = r_1 / R_{\rho 1}$;

$r_2' = r_2 / R_{\rho 2}$.

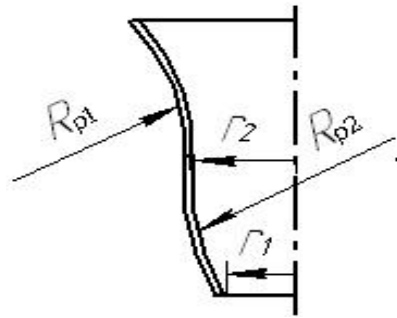


Рисунок 3.22 - Вогнуто-выпуклая деталь:

$R_{\rho 1}$ - 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

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

Приравняв формулы (3.67) и (3.68), определим, например, значение коэффициента трения в случае $f_1 = 0$:

$$f = \frac{(1 - \mu) \left(\sin \alpha_2 - \frac{r_2'}{r_1'} \sin \alpha_1 \right)}{\mp r_2' - \frac{r_2'}{r_1'} \mu \cos \alpha_1 + \mu \cos \alpha_2 \mp r_2'} \quad (3.69)$$

где α_1 - угол, определяющий вогнутую деталь;

α_2 - угол, определяющий выпуклую деталь.

3.2.1.4 Формовка вогнуто-конической и выпукло-конической детали

Определили трение для вогнуто-конической и выпукло-конической детали для случая $f_1 \approx 0$ (рис. 3.23).

Используем уже полученные ранее уравнения (3.53) и (3.54) для двух зон детали, приравняв их между собой, так как давление одинаково для вогнутой (выпуклой) и конической частей детали:

$$f = \frac{(1 - \mu)(\sin \alpha_2 - r' \sin \alpha)}{\mu(\cos \alpha_2 - r' \cos \alpha) \mp r'}. \quad (3.70)$$

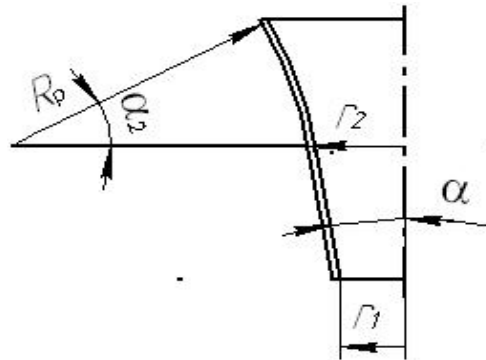


Рисунок 3.23 - Вогнуто-коническая деталь:

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_p , проведенным к кромке вогнутой (выпуклой) детали и проведенным к точке перехода конической части в вогнутую (выпуклую) часть

3.2.1.5 Формовка с активными силами трения

В основу нового устройства заложена задача [47]: повысить качество заготовок и изготовить детали с равномерной толщиной (рис. 3.24) путем создания дополнительных активных сил трения на наружной поверхности заготовки. Рассмотрим границы применимости устройства. Оно содержит выталкиватель 1, контейнер 2, матрицу 3, прижим 4, пуансон 5, плиту штампа 6, на которую установлен контейнер 2, внутри него на подкладной плите расположен эластичный элемент 7.

Давление эластичным элементом создается с помощью подкладной плиты, усилие подпора которой определяется с помощью буферного устройства 8 (либо пресса, либо штампа, что определяется необходимостью промышленного производства или эксперимента). Устройство работает следующим образом: заготовка 9 в виде усечённого конуса устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 3, а прилегающими к торцу меньшего основания – на выталкиватель 1. Затем заготовка зажимается по внутренним поверхностям к матрице 3 прижимом 4, а к выталкивателю 1 пуансоном 5. 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 10 вниз. Происходит пластическая деформация заготовки в условиях плоского растяжения и значительных активных сил трения, между пуансоном - заготовкой и эластичным элементом - 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 активные силы трения, так как перемещение заготовки отстает от подкладной плиты.

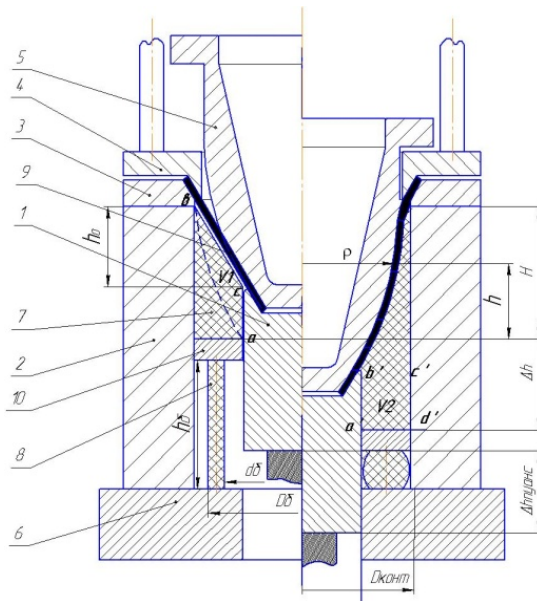


Рисунок 3.24 - Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей выпуклой формы (Патент 78709 - 2008112698):

1 - выталкиватель; 2 - контейнер; 3 - матрица; 4 - прижим; 5 - конус; 6 - плита штампа; 7 - эластичный элемент; 8 - буферное устройство; 9 - заготовка; 10 - подкладная плита

Величину создаваемого давления определяет эластичный буфер 8, находящийся под подкладной плитой 10. В основу расчета положено равенство усилий эластичного элемента и эластичного буфера, действующих на под-

кладную плиту (с разных сторон). Величина перемещения подкладной плиты равна величине сжатия эластичного буфера 8. Зная необходимое давление, находят усилие, действующее на подкладную плиту, приняв во внимание, что давление, создаваемое эластичным элементом в замкнутом объеме, распространяется одинаково во всех направлениях. Из условия равенства усилий как со стороны эластичного элемента, так и со стороны эластичного буфера имеем:

$$\frac{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)}{4}q = \frac{\pi(D_{\text{б}}^2 - d_{\text{б}}^2)}{4}q_{\text{б}}, \quad (3.71)$$

где $q, q_{\text{б}}$ - соответственно давления, создаваемые эластичным элементом и эластичным буфером;

$D_{\text{б}} = (0,75 - 0,8)D_{\text{конт}}$ - наружный диаметр эластичного буфера;

$d_{\text{б}} = d / (0,75 - 0,8)$ - внутренний диаметр эластичного буфера.

Принятые соотношения диаметров берутся из условия сжатия эластичного буфера до 25%. Это исключает быстрый износ эластичного буфера и предохраняет от разрушения контейнера при высоких давлениях, в случае ошибки при регулировке хода пуансона. Из выражения (3.71) находим:

$$q_{\text{б}} = q \frac{D_{\text{конт}}^2 - d^2}{D_{\text{б}}^2 - d_{\text{б}}^2}, \quad (3.72)$$

где $D_{\text{конт}}$ - внутренний диаметр контейнера, который находится из условия:

$$\frac{V_1}{V_{\text{эл.элемент}}} \leq \varepsilon \leq 0,25, \quad (3.73)$$

где $V_{\text{эл.элемент}}$ - объем эластичного элемента.

$$V_{\text{эл.элемент}} = V_{\text{эл.цил}} - V_{\text{кон}} - V_{\text{цил}} = \frac{\pi D_{\text{конт}}^2}{4} h_{\text{эл.цил}} - V_{\text{кон}} - V_{\text{цил}},$$

где $V_{\text{кон}}$ - внутренний объем, ограниченный конической заготовкой;

$V_{\text{цил}}$ - объем, сформированный цилиндрической частью выталкивателя при формообразовании;

$V_{\text{эл.цил}}$ - объем эластичного цилиндра;

$h_{\text{эл.цил}}$ - высота эластичного цилиндра.

$$V_{цил} = \frac{\pi}{4} d^2 (h_{дет} - h_0), \quad (3.74)$$

$$V_{кон} = \frac{\pi}{12} h_0 (D^2 + Dd + d^2), \quad (3.75)$$

где D - диаметр большего основания детали;

d - диаметр меньшего основания детали.

Определим диаметр контейнера с учетом записи (3.73):

$$D_{конт} = \sqrt{\left(\frac{V_1}{\varepsilon} + V_{кон} + V_{цил} \right) \frac{4}{h_{эл.цил} \pi}}. \quad (3.76)$$

Объем смещенной части эластичного элемента при формообразовании выпуклой детали вычисляется:

$$V_1 = V_{дет} - V_{цил} - V_{кон}, \quad (3.77)$$

где $V_{дет}$ - объем детали без учета припусков под зажимы, равный (рис. 3.25):

$$V_{дет} = 2\rho\pi R_\rho^2 a(\alpha_0 - \alpha_k) - \frac{\pi R_\rho^3}{2} (\alpha_0 - \alpha_k + 0,5 \sin 2\alpha_0 - 0,5 \sin 2\alpha_k) - 2\pi R_\rho a^2 (\alpha_0 - \alpha_k), \quad (3.78)$$

где

$$\sin \alpha_k = \sin \alpha_0 - \frac{h_{дет}}{R_\rho}. \quad (3.79)$$

По построенной или известной номограмме, с учетом найденного значения q_δ установлена взаимосвязь между деформацией эластичного буфера и геометрическим соотношением для применяемого материала эластичного буфера:

$$\frac{(D_\delta - d_\delta)}{h_\delta} = M,$$

где h_δ - высота эластичного буфера;

M - принятое значение.

Величина деформации сжатия эластичного буфера вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_\delta}{h_\delta}, \quad (3.80)$$

где Δh_δ - величина сжатия эластичного буфера.

Последние соотношения позволяют определить высоту эластичного буфера:

$$\frac{(D_{\delta} - d_{\delta})}{M} = h_{\delta}, \quad (3.81)$$

$$h_{\delta} = \frac{\Delta h_{\delta}}{\varepsilon}. \quad (3.82)$$

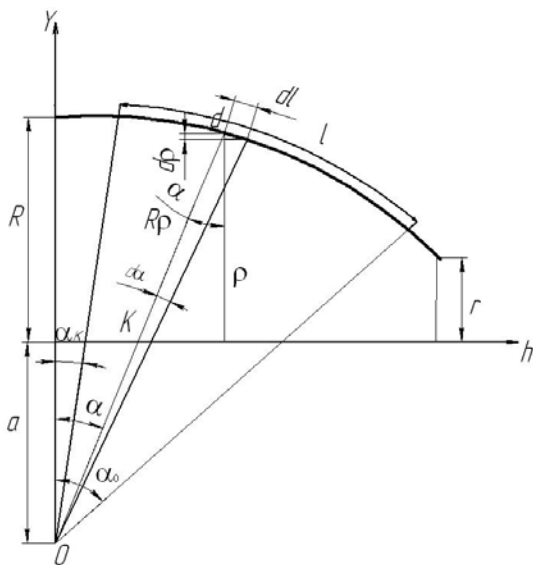


Рисунок 3.25 - Геометрическая схема детали выпуклой формы для определения объема и площади детали:

R_{ρ} - радиус детали в меридиональном направлении; Kd - радиус в тангенциальном 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_k - угол, образованный радиусом R_{ρ} , проведенным к кромке детали большего основания, и осью, проведенной из центра радиуса R_{ρ} и перпендикулярной оси симметрии детали; α - угол, образованный радиусом R_{ρ} , проведенным к кромке (со стороны большего основания) элементарного участка, и осью, проведенной из центра радиуса R_{ρ} и перпендикулярной оси симметрии детали; R - радиус большего основания детали; r - радиус меньшего основания детали; $dl, d\rho, d\alpha$ - размеры элементарного участка; a - расстояние от центра радиуса R_{ρ} до оси симметрии; l - участок с длиной образующей, где происходит непосредственный контакт пуансона с заготовкой

Приравняв два последних равенства, получим:

$$M = \frac{\Delta h_{\delta}}{\varepsilon(D_{\delta} - d_{\delta})}. \quad (3.83)$$

Чтобы найти Δh_{δ} , надо иметь в виду: величина сжатия эластичного буфера зависит от величины смещенного объема при формировании детали заданных размеров. Так как эластичный элемент находится в замкнутом объеме,

то внутреннее давление в нем зависит от возможного перемещения подкладной плиты 10, которая создает усилие сопротивления при сжатии эластичного буфера 8. При этом пуансон, внедряясь в эластичный элемент 7, перемещает часть объема V_1 (смещенный объем) в объем V_2 . Так как эластичный элемент практически несжимаем, то можно принять $V_1 = V_2$. Объем V_1 , сечение которого имеет фигуру, близкую к треугольнику Δabc , с одной стороны ограничен наружной поверхностью детали, а с другой – внутренней поверхностью эластичного элемента, совпадающей с наружной поверхностью заготовки. Объем V_2 имеет в сечении фигуру прямоугольника $a'b'c'd'$ и равен:

$$V_2 = \frac{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)}{4} \Delta h_{\sigma}.$$

Из условия равенства $V_1 = V_2$ находим:

$$\Delta h_{\sigma} = \frac{4V_1}{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)}. \quad (3.84)$$

Далее по номограмме выбирают точку пересечения трех линий: горизонтальной прямой, соответствующей давлению эластичного буфера; вертикальной прямой, соответствующей выбранному значению деформации сжатия буфера; кривой зависимости $q_{\sigma} = f(\varepsilon)$ при геометрическом соотношении M . Причем значения M и ε должны удовлетворять зависимости (3.83). По формулам (3.81, 3.82) определяется высота эластичного буфера.

Для реализации процесса формообразования предлагаемым способом необходимым условием является создание активных сил трения на границе эластичный элемент – заготовка, которое выполняется в том случае, если величина перемещения эластичного буфера Δh_{σ} больше величины перемещения пуансона Δh :

$$\Delta h_{\sigma} = \frac{4V_1}{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)} \geq \Delta h. \quad (3.85)$$

Из выражения (3.85) найдем величину диаметра контейнера, удовлетворяющую выполнению условия:

$$D_{\text{конт}} = \sqrt{\frac{4V_1}{\pi \Delta h_{\sigma}} + d^2}. \quad (3.86)$$

Использование устройства предлагаемой конструкции позволяет формировать тонкостенные осесимметричные детали выпуклой формы с большими отклонениями диаметров большого основания к меньшему и, регулируя давление заготовки на пуансон с помощью эластичного элемента, добиться равномерного распределения толщины вдоль образующей.

3.2.2 Теоретическая оценка применимости процесса формовки при отсутствии эластичного элемента

3.2.2.1 Формовка выпуклой детали

Для выпуклой детали давление, создаваемое эластичным элементом, отсутствует, если $k = 0$. Тогда из формулы (3.53) получим:

$$f \geq \frac{(1-\mu)\sin\alpha}{\mu\cos\alpha + r'} \quad (3.87)$$

В случае отсутствия эластичного элемента, т.е. давления, за параметр, обеспечивающий минимизацию функции, можно принять коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела или коэффициент трения. В листштамповочном производстве удобнее таким параметром выбрать f . Проводим минимизацию функционала (3.49) для выпуклой детали по коэффициенту трения f , используя условие отсутствия давления, создаваемого эластичным элементом: равенство $k=0$, при этом обозначения A и B введены выше (см. формулы (3.43), (3.44)):

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

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

$$f = \frac{(1-\mu) \left(\mu \cdot ctg\alpha - \frac{r'}{\sin\alpha} \right)}{(\mu \cdot ctg\alpha)^2 + \left(\frac{r'}{\sin\alpha} \right)^2} \quad (3.88)$$

Рассмотрим влияние угла на коэффициент трения при прочих равных условиях в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Значения коэффициента трения при $\mu = 0,5$ и различных значениях угла

α^0	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.

3.2.2.2 Формовка конической детали

Уравнение (3.54) имеет смысл, если:

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

$$f \geq \frac{(1 - \mu)}{\mu} \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.89)$$

Рассмотрим влияние угла на коэффициент трения при прочих равных условиях в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Значения коэффициента трения при $\mu = 0,5$ и различных значениях угла

α^0	17	12	8,6
f	0,31	0,21	0,15

С уменьшением угла коэффициент трения уменьшается.

3.2.3 Определение величины критической степени деформаций

Наиболее точные значения предельных параметров процесса для случая всестороннего состояния растяжения находят, используя критерий А.Д. Томленова [13,58,59]:

$$\varepsilon_{S_{кр}} = -\frac{m+1}{2-m} n, \quad (3.90)$$

где n - показатель механических свойств материала;

m - коэффициент, который вычисляется по формуле

$$m = \frac{(1 + R_L) \cdot R_L \cdot e_\theta + R_L^2 e_\rho}{(1 + R_L) \cdot R_L \cdot e_\rho + R_L^2 e_\theta}, \quad (3.91)$$

где R_L - коэффициент Лэнкфорда, вычисляемый по формуле

$$R_L = \frac{\mu}{(1 - \mu)}. \quad (3.92)$$

4 Способы получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы из конической заготовки с использованием процесса отбортовки (обтяжки)

Существующая технология с использованием деформирования разжимными секционными пуансонами [3,8,37,53] допускает у деталей после штамповки по окружности в тангенциальном (широтном) направлении огранку (из-за которой геометрические формы детали не соответствуют разработанным требованиям, ухудшая эксплуатационные характеристики изделия). Поэтому деталь в дальнейшем приходится калибровать, используя весьма трудоемкую операцию термофиксации. При обтяжке с помощью разжимных пуансонов используют штамп, схема которого приведена на рис. 4.1, и механизм огранки состоит в следующем.

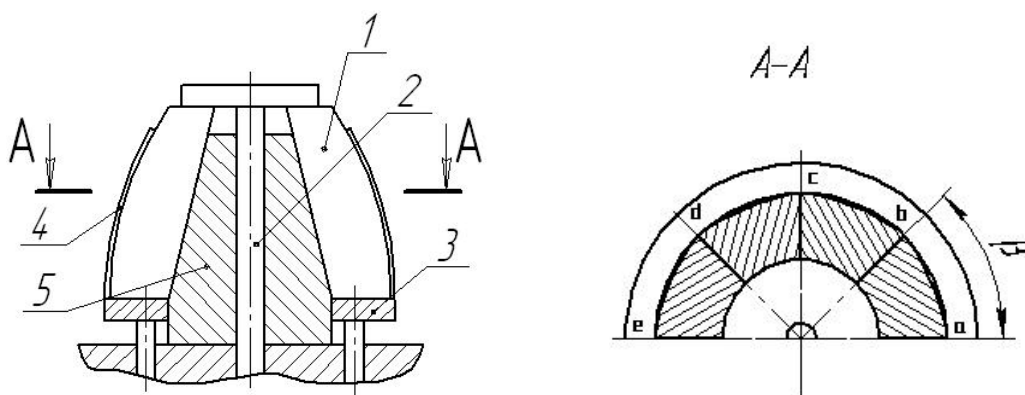


Рисунок 4.1 - Штамп для обтяжки с помощью разжимного пуансона:

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 А-А). При этом ввиду 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 (рис. 4.2). При движении сегментов вниз по конусу 5 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 и, 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 подвергают термофиксации, даже при использовании конструкции сегментов с гребешками (рис. 4.2).

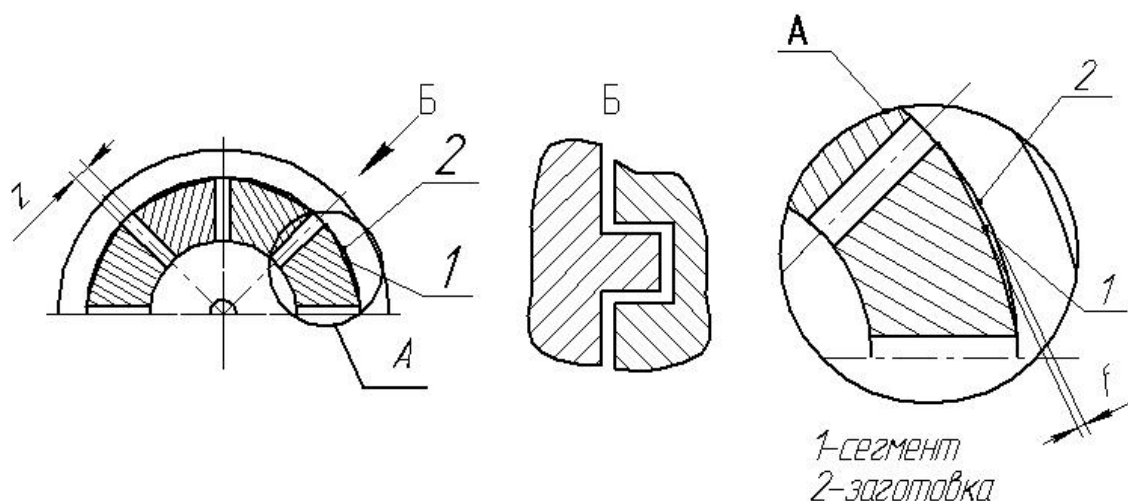


Рисунок 4.2 - Конструкция сегментов с гребешками

Кроме того, к недостаткам способа следует отнести неравномерность распределения толщины детали в обоих направлениях, которая по толщине в отдельных случаях достигает 15-20% [6,16,39]. 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 [16] формообразование деталей за один переход возможно 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 потребуются 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 удастся. 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 рис. 4.3.

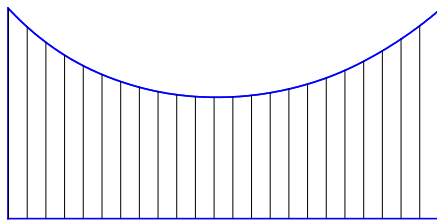


Рисунок 4.3 - Характер изменения толщин тонкостенных осесимметричных деталей, получаемых способом обтяжки с помощью разжимных пуансонов

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, модернизацией его. Так, например, для повышения технологических возможностей в работе [45] предложен разжимной пуансон, который содержит секторы в виде упругих кони-

ческих колец со сквозной конической прорезью. В качестве материала для изготовления упругих конических колец применили сталь с высоким пределом прочности. Применение конструкции, описываемой в [45], направлено на повышение качества изготавливаемых деталей за счет устранения штамповочных следов, возникающих на стыке секторов и клиньев. В работе [1] 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.

Таким образом, разработка новых способов для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы и создание ресурсосберегающих, научно обоснованных технологий, повышающих производительность труда, качество продукции, является важнейшей задачей современной промышленности. Рассмотрим применительно к подобным деталям новые устройства с использованием эластичных элементов.

Получение качественной тонкостенной осесимметричной детали усеченной сужающейся формы без огранки за один ход пресса возможно достичь за счет устройства (рис. 4.4), 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 [44].

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 поверх-

ность матрицы h_m по высоте больше высоты заготовки h_3 , а высота эластичного элемента h_3 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.

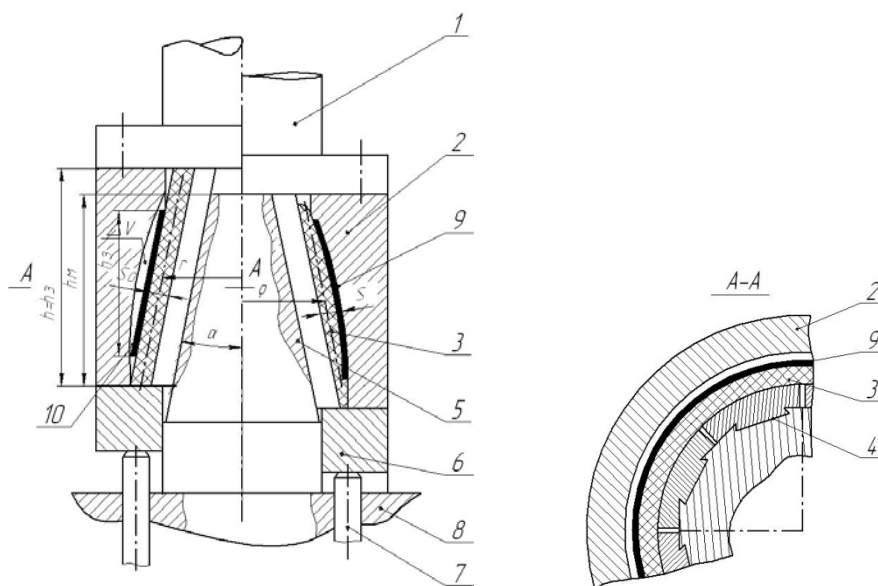


Рисунок 4.4 - Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы (Патент 128527 - 2012147877):

1 - пуансон; 2 - матрица; 3 - эластичный элемент; 4 - раздвижные сектора; 5 - конус; 6 - опорное кольцо; 7 - шпилька; 8 - плита прессы; 9 - деталь; 10 - заготовка

Особенность такой конструкции устройства в том, что изготовленная деталь лишена огранки и ее наружная поверхность практически совпадает с рабочей поверхностью матрицы, тем самым устранена дополнительная операция калибровки. Устройство должно удовлетворять следующим условиям. Чтобы избежать при увеличении диаметра эластичного элемента его уменьшения 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, увеличивается в диаметре и уменьшается в толщине, что соответствует условию плоского деформированного состояния, когда деформация по толщине ε_s равна по величине и противоположна по знаку деформации увеличению диаметра эластичного элемента ε_θ . Приблизительно можно записать, считая выполненным условие постоянства объема для эластичного элемента:

$$\varepsilon_s \approx -\varepsilon_\theta \text{ или } \frac{\rho - r}{r} \approx -\frac{S - S_0}{S_0}, \quad (4.1)$$

где ρ, r - соответственно радиусы по средней поверхности средние по высоте эластичного элемента до и после деформации;

S_0, S - соответственно толщины средние 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 :

$$\Delta V_\rho = \Delta V$$

или

$$\pi \frac{(\rho^2 - r^2)^2}{\cos \alpha} h_m = \Delta V, \quad (4.2)$$

где h_m - высота рабочей поверхности матрицы;

α - угол конусности конуса.

Выразим r из (4.1) и, подставив его в (4.2), после преобразований получим:

$$\rho = \left(2 - \frac{S}{S_0} \right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m} \left[\left(2 - \frac{S}{S_0} \right)^2 + 1 \right]}. \quad (4.3)$$

Приняв во внимание, что $\rho = \rho_0 - 0,5S$, имеем:

$$S = 2 \left(\rho_0 - \left(2 - \frac{S}{S_0} \right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m \left[\left(2 - \frac{S}{S_0} \right)^2 + 1 \right]}} \right). \quad (4.4)$$

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

$$\frac{S}{S_0} \leq k \leq 0,9 \div 0,75$$

или

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

где

$$S = 2 \left(\rho_0 - (2 - k) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m \left[(2 - k)^2 + 1 \right]}} \right), \quad (4.5)$$

ρ_0 – средний радиус детали.

На основе вышерассмотренного устройства [76] (рис. 4.4) предложено усовершенствованное (рис. 4.5), отличающееся наличием эластичного элемента в виде двух конических оболочек 3 и 4. Оно состоит все также из пуансона 1, жестко соединенного с матрицей 2, конуса с направляющими пазами 5, опорного кольца 6, шпилек 7, установленных в плиту прессы 8, раздвижных секторов 11. Устройство работает следующим образом. Опорное кольцо 6 поднято вверх. Пуансон с матрицей отведены кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки 10. Раздвижные секторы 11 подняты вверх вместе с эластичным элементом в виде двух конических оболочек 3 и 4. 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_m по высоте больше высоты заготовки h_z , а высота эластичного элемента h_3 равна высоте матрицы h . При движении пуансона вниз вместе с ним опускается и матрица 2, преодолевая сопротивление опорного кольца 6, раздвижных секторов 11 и эластичного элемента в виде двух конических оболочек 3, 4 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.

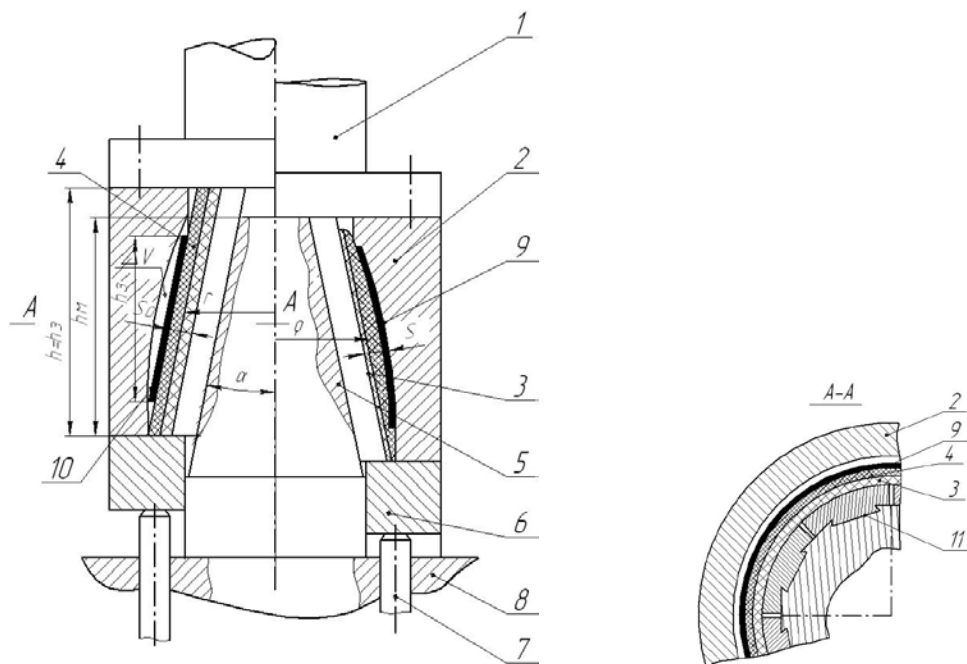


Рисунок 4.5 - Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы:

1 - пуансон; 2 - матрица; 3, 4 - эластичные элементы; 5 - конус; 6 - опорное кольцо; 7 - шпилька; 8 - плита прессы; 9 - деталь; 10 - заготовка; 11 - раздвижные сектора

Особенность такой конструкции устройства в том, что изготовленная деталь лишена огранки и ее наружная поверхность практически совпадает с рабочей поверхностью матрицы, что устраняет дополнительную операцию калибровки. Устройство должно удовлетворять следующим условиям. В конечном положении между секторами образуется зазор. Во избежание затекания эластичного элемента (в виде двух конических оболочек) и его защемления в момент подъема секторов в эти зазоры необходимо внутренний эластичный элемент выполнить из более твердого материала. Чтобы не допустить при увеличении диаметра эластичного элемента его уменьшения высоты и возникновения на поверхности контакта с заготовкой сжимающих сил трения,

которые могут привести к потере устойчивости тонкостенной заготовки, эластичные элементы в районах наибольшего и наименьшего диаметров матрицы зажимаются (в начальный момент) между матрицей и секторами. Для надежного обеспечения условия зажима эластичного элемента в виде двух конических оболочек 3 и 4 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 опорным кольцом 6. Это устраняет сжимающие силы трения на внутренней поверхности заготовки. Эластичный элемент, деформируясь, увеличивается в диаметре и уменьшается в толщине, что 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 . Приближенно можно записать, считая выполненным условие постоянства объема для эластичного элемента в виде двух конических оболочек (см. формулу 4.1).

Несмотря на уменьшение толщины эластичного элемента в виде двух конических оболочек, 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 виде двух конических оболочек в исходном состоянии ΔV (см. формулу 4.2). Выразим r из (4.1) и, подставив его в (4.2), после преобразований получим формулу (4.3). Приняв во внимание, что $\rho = \rho_\theta - 0,5S$, имеем формулу (4.4). Исходную толщину эластичного элемента в виде двух конических оболочек найдем, поставив ограничения по степени деформации:

$$\frac{S}{S_0} \leq k \leq 0,9 \div 0,75$$

или
$$S = S_1 + S_2; S_0 = \frac{S_1 + S_2}{k},$$

где
$$S_1 + S_2 = 2 \left(\rho_\theta - (2-k) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m [(2-k)^2 + 1]}} \right), \quad (4.6)$$

ρ_0 - средний радиус детали;

S_1 - толщина внешнего эластичного элемента;

S_2 - толщина внутреннего эластичного элемента.

В актуальном способе, включающем процесс отбортовки, последовательно производят отбортовку на торце малого диаметра заготовки, а затем отбортовку элементов заготовки большего диаметра. Способ реализуется с помощью устройства (рис. 4.6) и его суть состоит в следующем. При опускании раздвижных секторов 3 происходит увеличение диаметров эластичного элемента 4, который выполнен в виде конической оболочки с переменной толщиной стенки, причем наибольшая толщина соответствует зоне меньших диаметров, а наименьшая - зоне больших диаметров. Угол конусности внутренней поверхности эластичного элемента равен углу конусности конуса с направляющими пазами, а угол конусности наружной поверхности элемента 4 меньше угла конусности образующей рабочей поверхности матрицы. Вследствие такой формы эластичного элемента в первую очередь начинают деформироваться элементы заготовки меньшего диаметра. Они прижимаются к рабочей поверхности матрицы меньшего диаметра, после чего происходит отбортовка кромки заготовки наименьшего диаметра. Это обеспечивается благодаря тому, что угол конусности заготовки больше угла конусности эластичного элемента.

В процессе деформирования расстояние между заготовкой и рабочей поверхностью матрицы увеличивается по мере увеличения радиуса заготовки. При этом силы трения, действующие на заготовку как со стороны матрицы, так и со стороны эластичного элемента, направлены в сторону наибольшего диаметра заготовки.

Предложенная последовательность деформирования обеспечивает практически одинаковые степени деформации элементов заготовки по толщине и позволяет получать детали различной формы (конической, выпуклой, вогнутой) с равномерной толщиной стенки. При изготовлении конических деталей

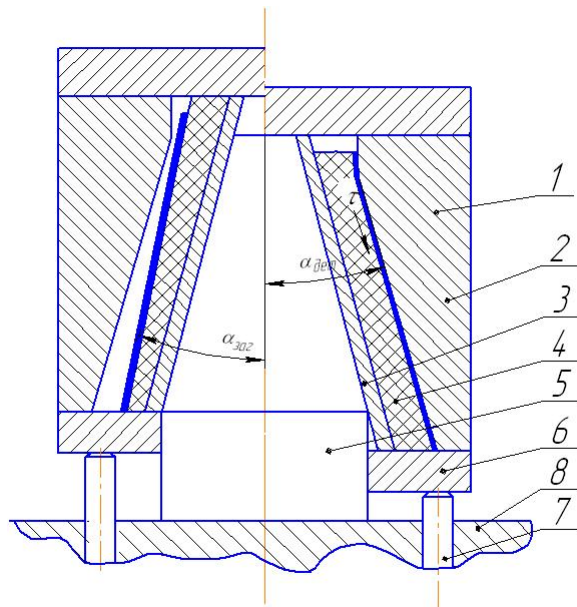
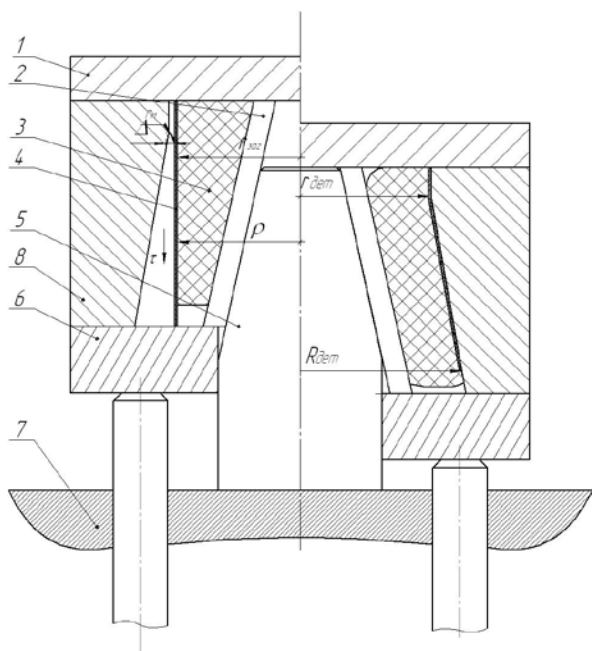


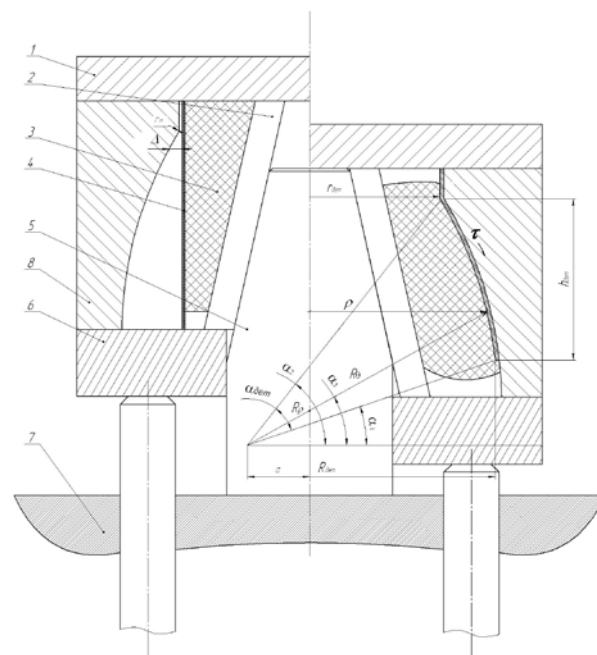
Рисунок 4.6 - Способ формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы и устройство для его осуществления (для получения детали с равномерной толщиной):

1 - верхняя плита штампа; 2 - матрица; 3 - раздвижные сектора; 4 - эластичный элемент; 5 - конус; 6 - опорное кольцо; 7 - шпилька; 8 - нижняя плита штампа

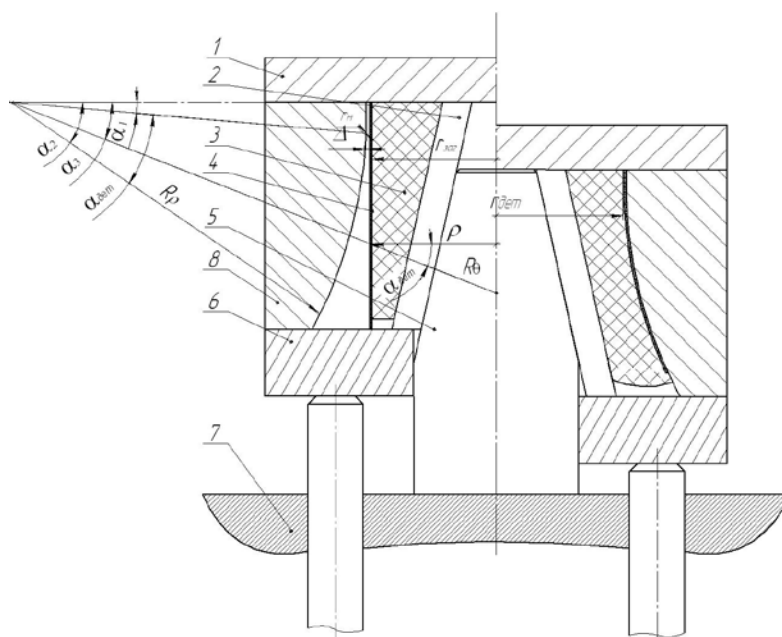
предлагаемым способом для достижения высокой точности размеров необходимо, чтобы степень деформации элементов составляла 5... 10 % (чтобы все элементы в зоне сварного шва продеформировались в соответствии с формой матрицы). В процессе деформирования при абсолютно одинаковом увеличении диаметров заготовки степени деформации элементов будут разными: наибольшая – у элементов зоны наименьшего диаметра, а наименьшая – у элементов зоны наибольшего диаметра. Одинаковое перемещение элементов заготовки в радиальном направлении объясняется работой устройства с разжимными секторами: двигаясь вниз, они увлекают за собой и эластичную среду, которая увеличивается в диаметре, и заготовку. Можно предположить, что все элементы заготовки перемещаются параллельно оси устройства на одинаковую величину. Для того чтобы получить деталь из заготовки с одинаковой (равномерной) толщиной стенки, угол конусности заготовки должен быть меньше угла конусности детали. При этом элементы зоны большего диаметра получают и большее абсолютное перемещение, что позволяет приблизить степень их деформации к степени деформации элементов, находящихся в зоне малого диаметра.



коническая деталь



выпуклая деталь



Рассмотрим возможность формообразования тонкостенных осесимметричных деталей, позволяющую повысить качество изготовления за счет равномерного распределения толщины вдоль образующей детали, тем самым интенсифицируя технологический процесс, снижая трудоемкость и устраняя механическую обработку. Схема производства, основанная на способе формовки с применением эластичного элемента, представлена на рис. 4.7 и реализуется с помощью устройства, содержащего под верхней плитой штампа 1 раздвижные сектора 2, эластичный элемент 3, матрицу 8, конус с направляющими пазами 5, опорное кольцо 6, установленные на плиту штампа 7. Каждый эластичный элемент выполнен в виде конической оболочки переменной толщины: с наибольшей толщиной - в зоне малых диаметров, а с наименьшей – в зоне больших диаметров. Заготовка применяется цилиндрическая с радиусом:

$$r_{заг} = const .$$

Преимущество такой заготовки в том, что она получается из полосы гибкой и сваркой в сравнении с традиционными коническими заготовками из секторов. Это позволяет, во-первых, снизить трудоемкость, а во-вторых, значительно повысить КИМ.

Для получения равномерной толщины стенки тонкостенной детали необходимо создать такие внешние условия, которые позволяют получить одинаковые деформации по толщине за счет меридиональных, тангенциальных напряжений растяжений. Результат достигается при деформировании за счет происходящего увеличения внутреннего диаметра эластичного элемента. В предложенной компоновке эластичный элемент перемещается в направлении от меньшего к большему диаметру деформируемой заготовки, что является причиной возникновения касательных напряжений на поверхности контакта эластичной среды и внутренней поверхности заготовки. Растягивающие меридиональные напряжения, возрастая от свободного торца с большим диаметром к меньшему диаметру, прижатому к рабочей поверхности матрицы, позволяют утонить элементы в зоне малого диаметра заготовки. Благодаря растягивающим напряжениям, деформация по толщине может достичь значений, как у элементов в зоне наибольшего диаметра, хотя у элементов заготовки меньшего диаметра тангенциальная деформация меньше, чем у элементов заготовки большего диаметра. Для реализации процесса будем стремиться к ми-

нимальному значению зазора Δ и созданию условий, при которых заготовка не выскальзывала бы. Поэтому радиус закругления матрицы выбирается с учетом изгиба [57].

Предложен способ для изготовления качественной тонкостенной осесимметричной детали бочкообразной формы с использованием устройства, содержащего под верхней плитой штампа 1 раздвижные сектора 2, эластичный элемент верхний 3, эластичный элемент нижний 4, матрицу 5,6, конус с направляющими пазами 7, опорное кольцо 8, установленные на плиту штампа 9. Раздвижные сектора, эластичный элемент 4 с заготовкой опираются на кольцо 8. Верхняя часть устройства отведена на расстояние, позволяющее установить цилиндрическую заготовку на эластичные элементы. При опускании верхней части происходит смыкание двух матриц, нижняя из которых опирается на кольцо 8.

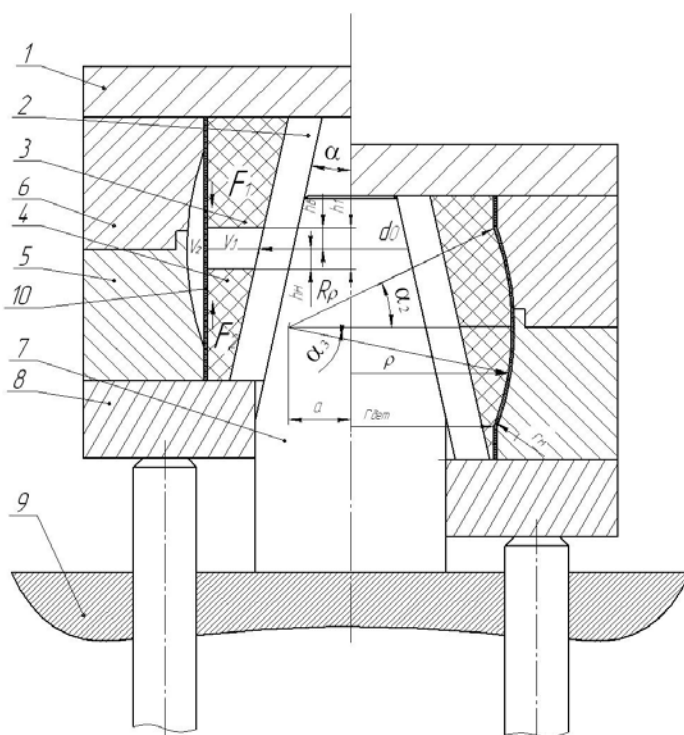


Рисунок 4.8 - Способ формообразования тонкостенной осесимметричной детали бочкообразной формы:

1 - верхняя плита штампа; 2 - раздвижные сектора; 3 - эластичный элемент верхний; 4 - эластичный элемент нижний; 5, 6 - матрицы; 7 - конус; 8 - опорное кольцо; 9 - нижняя плита; 10 - деталь

Обязательным является условие: высота раздвижных секторов и общая высота двух матриц должны быть равны. При движении верхней плиты образованная компоновка, состоящая из матрицы, заготовки, эластичных элементов, раздвижных секторов, перемещается вниз. При этом происходит увеличение секторов по радиусу за счет их перемещения по конусу. Это является причиной давления на эластичные элементы, расположенные по торцам заготовки, деформирующиеся идвигающиеся одновременно навстречу друг другу, увеличивая в размерах наружный диаметр. Каждый эластичный элемент выполнен в виде конической оболочки переменной толщины: с наибольшей толщиной - в зоне малых диаметров, а с наименьшей - в зоне больших диаметров. Заготовка применяется цилиндрическая с радиусом:

$$r_{заг} = const .$$

Преимущество такой заготовки в том, что она получается из полосы гибкой и сваркой в сравнении с традиционными коническими заготовками из секторов. Это позволяет, во-первых снизить трудоемкость, а во-вторых, значительно повысить КИМ. Возможно использование одной заготовки для небольших размеров деталей, с целью получения из нее двух.

На внутренней поверхности заготовки и эластичных элементов создают силы трения, направленные навстречу друг другу. В результате действия таких сил происходит увеличение напряжений в частях заготовки, расположенных ближе к торцу. Для реализации способа, обеспечивающего возможность получения детали с минимальной разнотолщинностью, необходимо выполнить условие равенства сил:

$$F_1 = F_2 ,$$

где F_1 - сила трения, возникающая между внутренней поверхностью заготовки и эластичным элементом 3;

F_2 - сила трения, возникающая между внутренней поверхностью заготовки и эластичным элементом 4.

Величина силы трения зависит от давления на площадь контакта и от коэффициента трения. Для особо выпуклой детали необходимо использовать

высокие показатели давления и трения (например, более твердую эластичную среду). Следует учесть особенность деформирования элементов: в заключительной стадии они не должны превышать 25% степени деформации; оба эластичных элемента в момент их сжатия должны находиться на уровне смыкания матриц.

Рассмотрим обоснованный, повышающий производительность труда, качество продукции способ, включающий процесс отбортовки (рис. 4.9).

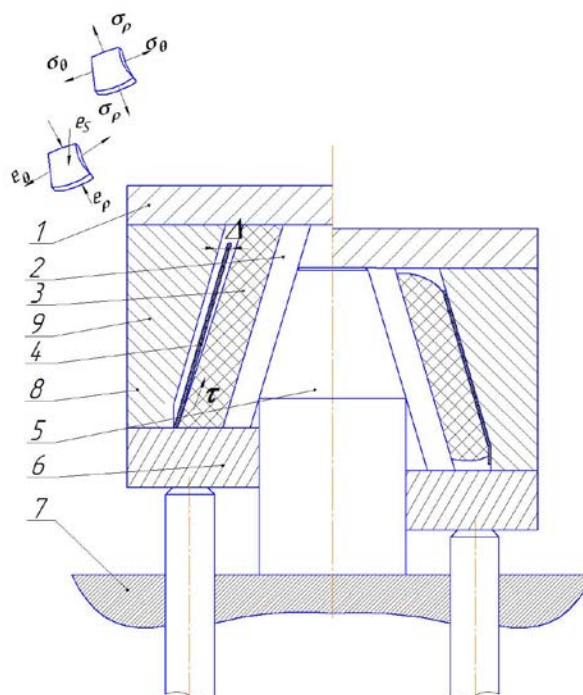


Рисунок 4.9 - Способ формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы на основе процесса отбортовки: 1 - верхняя плита штампа; 2 - раздвижные сектора; 3 - эластичный элемент; 4 - заготовка; 5 - конус; 6 - опорное кольцо; 7 - нижняя плита штампа; 8 - матрица; 9 - деталь

Опорное кольцо 6 поднято вверх. Матрица отведена кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки. Раздвижные секторы 2 подняты вверх вместе с эластичным элементом 3. В этом положении устанавливают конусную заготовку сверху между эластичным элементом и кольцевым выступом 10. Элементы заготовки наибольшего диаметра деформируются путем отбортовки (схема напряженно-деформированного состояния соответствует процессу отбортовки), вовлекая в процесс элементы наименьшего диаметра по

направлению действия сил трения между заготовкой и эластичным элементом. Этим достигается возможность получить одинаковые деформации по толщине и минимальную разнотолщинность детали. Эластичный элемент выполнен в виде конической оболочки переменной толщины: причём наибольшая толщина - в зоне больших диаметров, а наименьшая – в зоне малых диаметров. Угол конусности внутренней поверхности эластичного элемента равен углу конусности конуса с направляющими пазами, а наружная поверхность меньше угла конусности образующей рабочей поверхности матрицы.

4.1 Анализ напряженно-деформированного состояния процесса отбортовки (обтяжки)

Введем некоторые общие допущения для всех рассматриваемых в разделе способов (см. рис. 4.1-4.9):

- традиционные допущения [14];
- материал считаем трансверсально-изотропным телом [59];
- трение учитывается по закону Кулона.

Используя инженерный метод решения для получения деталей с минимальной разнотолщинностью, выполняем условие (3.4). Для решения функционала необходимо найти технологическую толщину S_T с учетом принятых допущений. Минимизацию выражения (3.4) 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 пока-

зал 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 [10,13,59]. При решении инженерным методом уравнение равновесия в полярной системе координат для случая формообразования заготовки в заключительной стадии процесса с использованием эластичного элемента примет вид [60,50]

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{f\rho}{\sin \alpha} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{q \left(1 \mp \frac{f_1}{f} \right)}{S_T} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (4.7)$$

где q - давление, создаваемое эластичным элементом;

R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении;

R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении;

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 ;

\mp - знак, определяющий характер сил трения:

– - относится к случаю, когда активные силы трения возникают на внутренней поверхности заготовки, а реактивные силы - по наружной поверхности заготовки;

+ - относится к случаю, когда активные силы трения возникают на внутренней и наружной поверхностях заготовки.

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.

4.2 Исследование способа формообразования деталей из конической заготовки

Проведем анализ применительно к предложенным способам (см. рис. 4.4-4.6). Будем считать, что соотношение напряжений σ_ρ и σ_θ в процессе деформирования равно нулю, т.е. заготовка деформируется в условиях линейного напряженного состояния.

Запишем уравнение связи в виде

$$S_T = S_{заг} \left[1 - (1 - \mu) \cdot \frac{\sigma_\rho / \sigma_\theta + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_\rho / \sigma_\theta} \left(\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{заг}} - 1 \right) \right], \quad (4.8)$$

где $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r_{дет}}$, $\bar{\rho}_{заг} = \frac{\rho_{заг}}{r_{дет}}$ - соответственно относительные радиусы детали и заготовки.

В выражении (4.8) соотношение $\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{заг}}$ представим в виде линейной зависимости:

$$\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{заг}} = c + l \bar{\rho}. \quad (4.9)$$

Из двух неизвестных коэффициентов c определим из условия, что $\rho = r_{дет}$ (рис. 4.10):

$$\rho_{заг} = r_{дет} - \Delta. \quad (4.10)$$

В относительных единицах при $\bar{\rho}=1$:

$$\bar{\rho}_{заг} = 1 - \bar{\Delta}, \quad (4.11)$$

где $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{r_{дет}}$. Таким образом, $\frac{1}{1-\Delta} = c + l$. Отсюда:

$$c = \frac{1}{1-\Delta} - l. \quad (4.12)$$

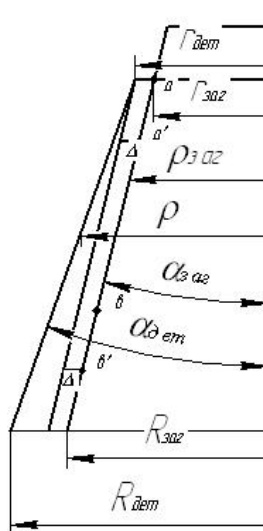


Рисунок 4.10 - Схема процесса:

$r_{дет}$ - меньший радиус детали; $R_{дет}$ - больший радиус детали; ρ - текущий радиус детали; $\rho_{заг}$ - радиус заготовки; $r_{заг}$ - меньший радиус заготовки; $R_{заг}$ - больший радиус заготовки; Δ - горизонтальное перемещение элементов заготовки при деформировании в зоне наименьшего диаметра; $\alpha_{заг}$ - угол конусности заготовки; $\alpha_{дет}$ - угол конусности детали

Подставим (4.12) в (4.9) и получим:

$$\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{заг}} = \frac{1}{1-\Delta} + l(\bar{\rho}-1). \quad (4.13)$$

Зная l и c , можно найти наименьший и наибольший радиусы заготовки, используя (4.13):

$$\bar{\rho}_{заг} = \frac{\bar{\rho}}{\frac{1}{1-\Delta} + l(\bar{\rho}-1)}. \quad (4.14)$$

Подставим (4.8) в (3.5) и получим условие минимальной разнотолщинности с

учетом безразмерных величин $\bar{S}_{дет} = \frac{S_{дет}}{S_{заг}}$, $\frac{r_{дет}}{r_{дет}} = \bar{r}_{дет}$, $\frac{R_{дет}}{r_{дет}} = \bar{R}_{дет}$, т.е. от 1 до

$\bar{R}_{дет}$:

$$\int_1^{\bar{R}_{\text{дем}}} \left\{ \bar{S}_{\text{дем}} - \left[1 - (1 - \mu) \cdot \frac{\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta} + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}} \left(\frac{1}{1 - \Delta} + l(\bar{\rho} - 1) - 1 \right) \right] \right\}^2 d\bar{\rho} \rightarrow \min. \quad (4.15)$$

В выражении (4.15) соотношение напряжений будем считать величиной постоянной и равной среднему значению b :

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}, \quad (4.16)$$

где
$$b = \frac{\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta} + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}}, \quad (4.17)$$

$$b_1 = 1 \text{ при } \bar{\rho} = 1; \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta} = 0; \quad (4.18)$$

$$b_2 = \frac{(1 + f \cdot \text{ctg} \alpha_{\text{матр}}) \left(1 - \frac{1}{\bar{R}_{\text{дем}}} \right) + 1}{1 - \mu (1 + f \cdot \text{ctg} \alpha_{\text{матр}}) \left(1 - \frac{1}{\bar{R}_{\text{дем}}} \right)} \text{ при } \bar{\rho} = \bar{R}_{\text{дем}}. \quad (4.19)$$

Минимизацию выражения (4.15) проведем путем варьирования коэффициента l :

$$\frac{\partial}{\partial l} = \int_1^{\bar{R}_{\text{дем}}} \left\{ \bar{S}_{\text{дем}} - 1 - (1 - \mu)b + \frac{(1 - \mu)b}{(1 - \Delta)} + (1 - \mu)bl(\bar{\rho} - 1) \right\} (\bar{\rho} - 1) d\bar{\rho} = 0 \quad (4.20)$$

или
$$\left[\bar{S}_{\text{дем}} - 1 - b(1 - \mu) + \frac{b(1 - \mu)}{(1 - \Delta)} \right] \frac{(\bar{R}_{\text{дем}} - 1)^2}{2} + \frac{(1 - \mu)l}{3} (\bar{R}_{\text{дем}} - 1)^3 = 0, \text{ отсюда}$$

$$l = 3 \frac{1 + (1 - \mu)b - \bar{S}_{\text{дем}} - \frac{(1 - \mu)}{(1 - \Delta)} b}{2(\bar{R}_{\text{дем}} - 1)(1 - \mu)b}. \quad (4.21)$$

Чтобы вычислить l , следует найти соотношение между $\bar{\Delta}$ и $\bar{S}_{\text{дем}}$; при $\bar{\rho} = r_{\text{дем}}$ или $\bar{\rho} = 1$. Из (4.8) имеем, приравняв $\bar{S}_{\text{дем}} = \bar{S}_{\tau}$ и приняв соотношения: $r_{\text{дем}} - r_{\text{заг}} = \Delta$, или $1 - \bar{r}_{\text{заг}} = \bar{\Delta}$, или $\bar{r}_{\text{заг}} = 1 - \bar{\Delta}$.

Тогда
$$\bar{S}_{\text{дем}} - 1 = -(1 - \mu) \frac{(1 - \bar{r}_{\text{заг}})}{r_{\text{заг}}} = -(1 - \mu) \frac{\bar{\Delta}}{1 - \Delta},$$

отсюда

$$\bar{\Delta} = \frac{1 - \bar{S}_{\text{дем}}}{2 - \bar{S}_{\text{дем}} - \mu}. \quad (4.22)$$

Введенное допущение о деформировании заготовки в условиях линейного напряженного состояния можно пояснить таким образом: деформацию условно разбиваем на две стадии:

1. Когда все элементы заготовки увеличиваются на одну и ту же величину радиуса Δ (см. рис. 4.10) до момента соприкосновения элементов меньшего диаметра с матрицей. Напряжения на кромках заготовки равны нулю. Можно считать: в средней части рост напряжений незначительный, и примем соотношение напряжений $\sigma_\rho / \sigma_\theta$ на всем очаге деформаций близким к нулю.

2. Когда элементы меньшего диаметра зацементированы и деформация происходит только для элементов, расположенных в зоне большего диаметра. В этом случае имеют место меридиональные напряжения, которые должны возрастать от свободной кромки большего диаметра к элементам зоны меньшего диаметра.

Таким образом, объединяющим фактором проводимых аналитических расчетов для способов (см. рис. 4.4-4.6) служит соотношение напряжений: $\sigma_\rho / \sigma_\theta = 0$.

Рассмотрим условия 1-й стадии, при которых заготовка может скользить и деформироваться по коническому пуансону. Найдем напряжения согласно схеме действия сил (рис. 4.11). Уравнение равновесия сил (4.7) при отсутствии трения по наружной поверхности и с учетом геометрических соотношений $R_\rho = \infty$, $\alpha_{dem} = \alpha_{zag} = const$ преобразуется:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta (1 + f \cdot ctg \alpha_{dem}) = 0, \quad (4.23)$$

где α_{dem} - угол наклона вдоль образующей касательной, проведенной к рассматриваемому элементу с координатой ρ и осью симметрии.

Используем условие пластичности для трансверсально-изотропного тела:

$$\sigma_\theta = k\sigma_S = \sigma_S^*, \quad (4.24)$$

где σ_S - напряжение текучести;

k - коэффициент, равный $k = \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \mu}$ [13];

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

Решение (4.23) и (4.24) без учета упрочнения и изменения толщины примет вид

$$\sigma_\rho = k\sigma_S (1 + f \cdot ctg \alpha_{dem}) \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{R_{dem}} \right) \geq 0, \quad (4.25)$$

где $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r_{\partial em}}$; $\bar{R}_{\partial em} = \frac{R_{\partial em}}{r_{\partial em}}$.

Составим уравнение равновесия сил бесконечно малого элемента со стороны малого торца и, проведя аналогичные преобразования, как в случае для другого конца заготовки (большого диаметра), получим:

$$\sigma_{\rho} = k\sigma_s(1 - f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em}) \left(1 - \frac{1}{\rho}\right) \geq 0. \quad (4.26)$$

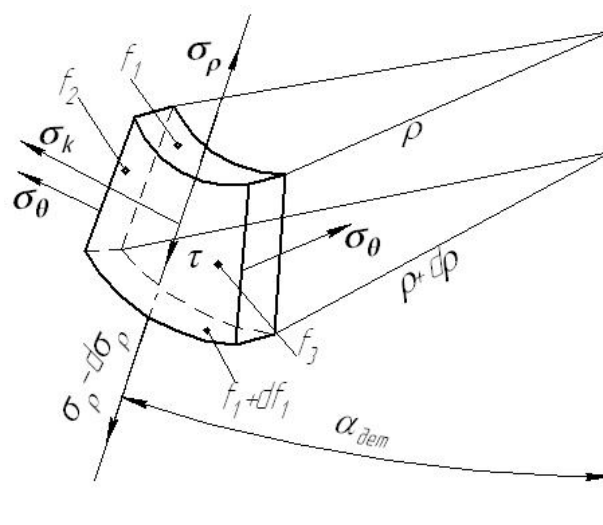


Рисунок 4.11 - Схема действия сил на заготовку:

ρ - текущий радиус детали; f_1, f_2, f_3 - площади бесконечно малого элемента; σ_k - контактное напряжение; τ - касательное напряжение от сил трения

Приравняв (4.25) и (4.26), получим:

$$(1 + f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em}) \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{\bar{R}_{\partial em}}\right) = (1 - f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em}) \left(1 - \frac{1}{\rho}\right). \quad (4.27)$$

Из (4.27) находим:

$$\bar{\rho} = \bar{R}_{\partial em} \frac{f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em}}{(1 + f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em})} + \sqrt{\left(\frac{f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em} \bar{R}_{\partial em}}{1 + f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em}}\right)^2} + \bar{R}_{\partial em} \frac{1 - f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em}}{1 + f \cdot \text{ctg}\alpha_{\partial em}}. \quad (4.28)$$

По формуле (4.28) находится радиус элементов, в которых напряжения σ_{ρ} как со стороны большого, так и со стороны малого торцев одинаковы при движении заготовки в направлении малого торца.

Анализируя выражения (4.25) и (4.26), делаем вывод: возникновение сжимающих напряжений возможно при движении заготовки с пуансона к

меньшему диаметру, если выполняется условие: $1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}} \leq 0$ или $f \geq \operatorname{tg} \alpha_{\text{дем}}$.

Видно, что $\sigma_{\rho} \leq 0$ в том случае, если

$$1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}} \leq 0 \quad (4.29)$$

или

$$f \geq \operatorname{tg} \alpha_{\text{дем}}.$$

Найдем, при каком соотношении f и угла $\alpha_{\text{дем}}$ заготовка не скользит с пуансона:

$$F_{\text{тр}} = P_{\text{н}} f; \quad (4.30)$$

$$P_{\text{с}} = P_{\text{н}} \sin \alpha \cdot \cos \alpha_{\text{дем}}. \quad (4.31)$$

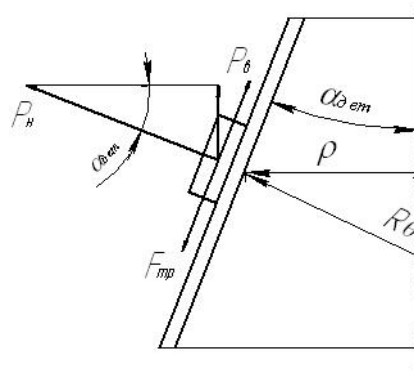


Рисунок 4.12 - Схема к определению условия, обеспечивающего деформацию заготовки

Из равенства формул (4.30) и (4.31) получим:

$$f \geq 0,5 \sin 2\alpha_{\text{дем}}, \quad (4.32)$$

где f - контактное трение заготовки;

$P_{\text{н}}$ - суммарное усилие от давления, равное

$$P_{\text{н}} = qF_{\text{дем}} = \frac{S_{\text{дем}} \sigma_{\text{с}}}{R_0} F_{\text{дем}},$$

где $F_{\text{дем}}$ - площадь детали;

$S_{\text{дем}}$ - толщина детали;

q - давление;

$\sigma_{\text{с}}$ - прочность материала;

R_0 - средний радиус в тангенциальном направлении.

Построим графики (рис.4.13) по формулам (4.29) и (4.31).

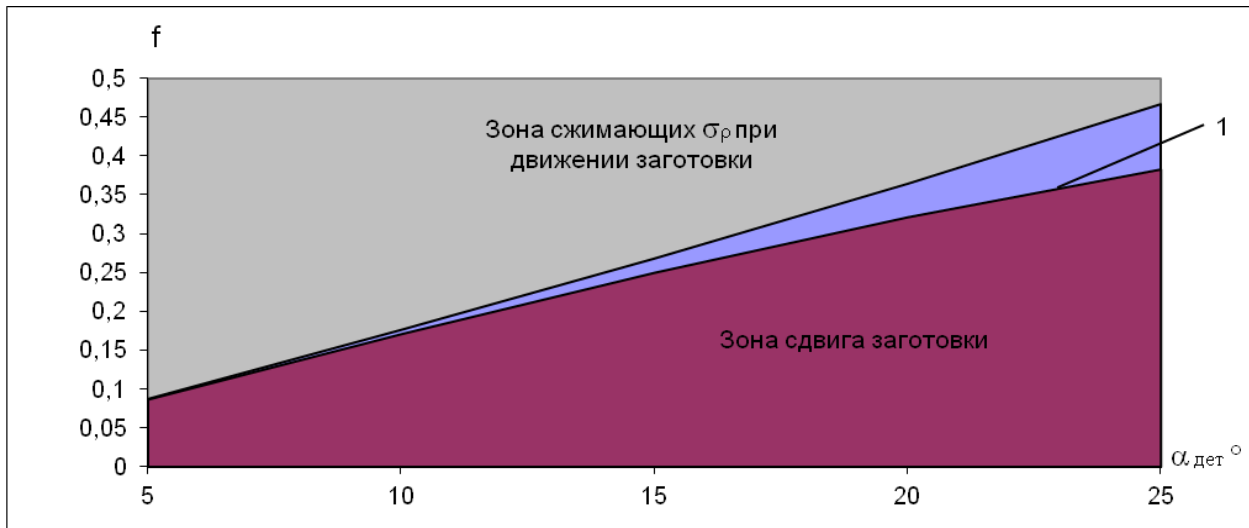


Рисунок 4.13 - Соотношение коэффициента трения и угла конусности, определяющих наличие сжимающих меридиональных напряжений и условия движения заготовки вниз по конусу

Из графика видно: если при заданной конусности заготовки коэффициент трения находится в зоне выше 1-ой кривой, то отсутствует движение заготовки в направлении меньшего диаметра. Следует отметить, что даже в случае движения в заготовке отсутствуют условия, вызывающие сжимающие меридиональные напряжения, так как последние имеют место при больших значениях коэффициента трения.

Рассмотрим условие, когда отсутствует движение заготовки к малому торцу и при деформировании наблюдается ее укорачивание с обеих сторон. Следовательно, τ касательные напряжения от малого торца меняют свое направление (см. рис. 4.6) и решение будет иметь вид

$$\sigma_{\rho} = k\sigma_s(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дет}}) \left(1 - \frac{1}{\rho}\right) \geq 0. \quad (4.33)$$

Решение со стороны большого торца определено формулой (2.21). Приравняв величины напряжений (4.33) и (4.25) в меридиональном направлении, получим:

$$\overline{\rho_{\text{ср}}} = \sqrt{R_{\text{дет}}}. \quad (4.34)$$

Найдем отношение $\frac{\sigma_{\rho_{\max}}}{\sigma_S}$ по формуле (4.33) или (4.25), подставив $\overline{\rho_{cp}} = \sqrt{R_{dem}}$.

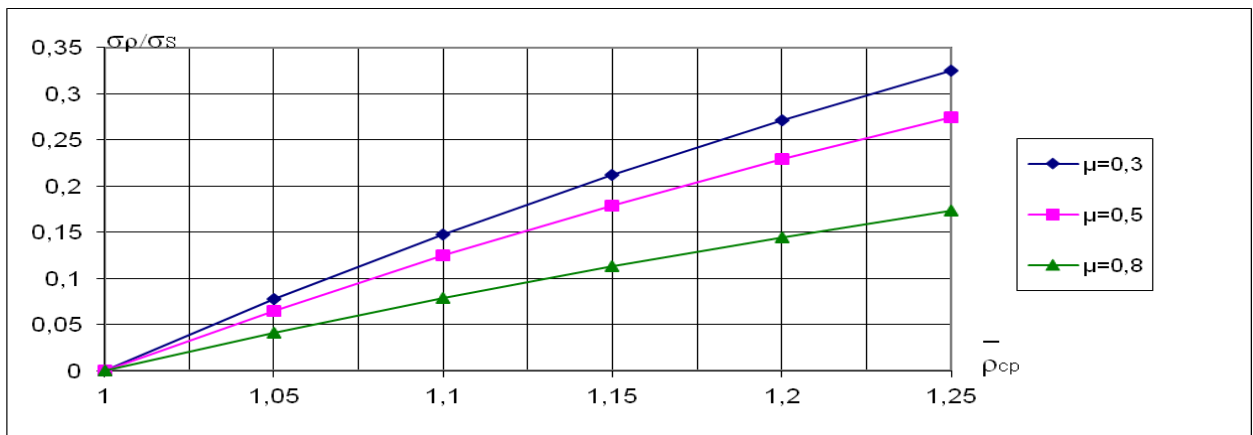


Рисунок 4.14 - Определение максимального напряжения при $f = 0,1$ и $\alpha_{dem} = 15^0$

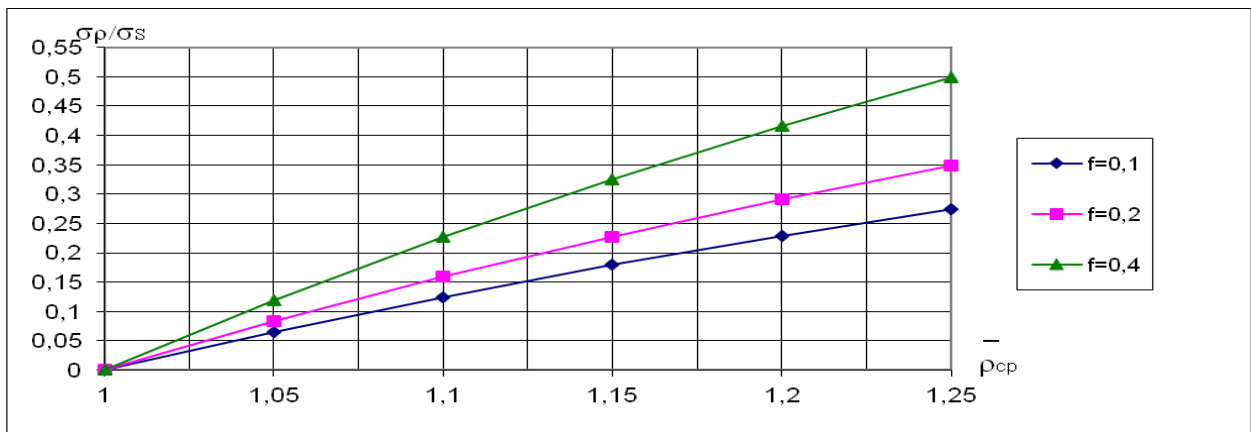


Рисунок 4.15 - Определение максимального напряжения при $\mu = 0,5$ и $\alpha_{dem} = 15^0$

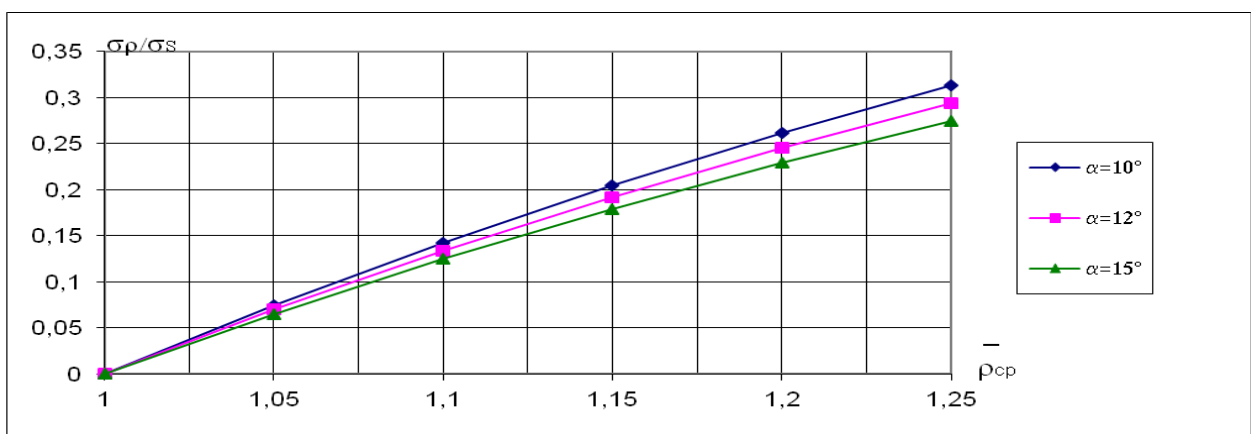


Рисунок 4.16 - Определение максимального напряжения при $\mu = 0,5$ и $f = 0,1$

На второй стадии решение уравнения равновесия сил (4.23) и условие пластичности (4.24) примут вид (4.25).

Значения соотношения напряжений, вычисленные по формуле (4.25), представлены графически (рис. 4.17).

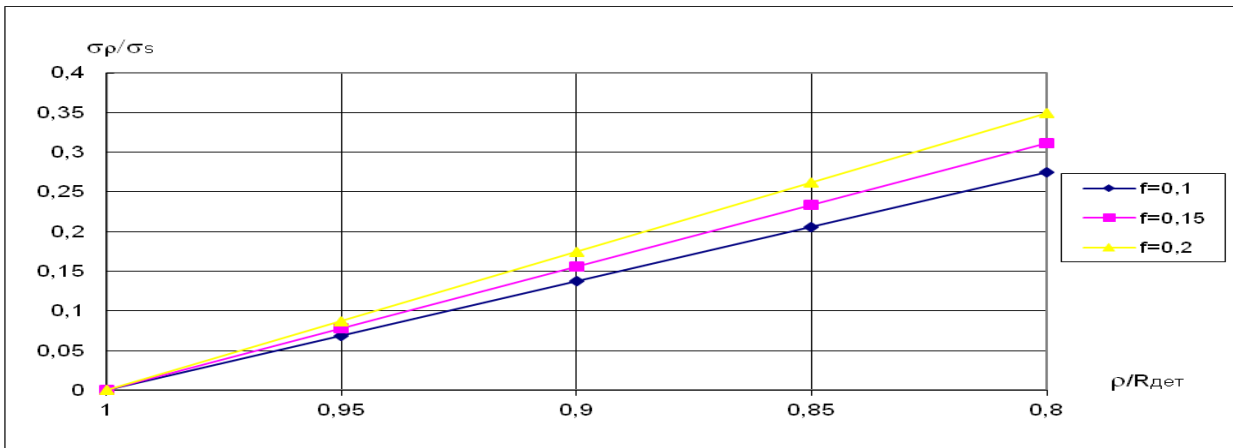


Рисунок 4.17 - Зависимость отношения напряжений σ_ρ / σ_s вдоль образующей при $\mu = 0,5$; $\alpha_{дет} = 15^0$ и различных значениях коэффициента трения

Приняв во внимание относительно небольшой рост напряжений σ_ρ , σ_θ на 2-й стадии формообразования к соотношению (практически равному нулю) этих же напряжений на 1-й стадии, которая более протяженна, примем допущение: в течение всего процесса $\sigma_\rho / \sigma_\theta$ равно нулю. Кроме того, в пользу принятого допущения, не влияющего на изменение толщины, говорит то обстоятельство, что тангенциальная деформация в элементах зоны малого диаметра на 2-й стадии близка к нулю.

С учетом сказанного на протяжении процесса выражение (4.17) примет вид

$$b = \frac{(\sigma_\rho / \sigma_\theta) + 1}{1 - \mu(\sigma_\rho / \sigma_\theta)} = 1, \quad (4.35)$$

$$S_T = S_{заг} \left[1 - (1 - \mu) \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_{заг}} - 1 \right) \right]. \quad (4.36)$$

По заданному соотношению $\frac{S_{дет}}{S_{заг}}$ (0,9-0,95), которое определяется из технологических условий для обеспечения полноценной калибровки заготовки, можно определить величину Δ , используя соотношение (4.22). Чтобы найти угол конусности заготовки, используем соотношение

$$\frac{\bar{R}_{заг} - \bar{r}_{заг}}{\bar{L}_{заг}} = \cos(90^0 - \alpha_{заг}). \quad (4.37)$$

Надо принять во внимание, что длина образующей заготовки $L_{заг}$ уменьшается и ее надо взять больше длины образующей детали. Из условия линейной

схемы напряженного состояния $\sigma_\rho \approx \sigma_\kappa \approx 0, \sigma_\theta \neq 0$ имеем $e_\rho = e_s$ (где e_ρ, e_s - соответственно деформации вдоль образующей и по толщине). Тогда:

$$\bar{L}_{заг} = \bar{L}_{дет} \frac{S_{заг}}{S_{дет}}. \quad (4.38)$$

Используя предложенные формулы (4.12, 4.14, 4.23, 4.35, 4.37, 4.38), построим графические зависимости. Характер графиков (рис. 4.18 – 4.21) позволяет сделать вывод: независимо от коэффициента анизотропии угол конусности заготовки меньше угла конусности детали; при значениях коэффициента анизотропии $\mu \geq 0,8$ эта разница увеличивается.

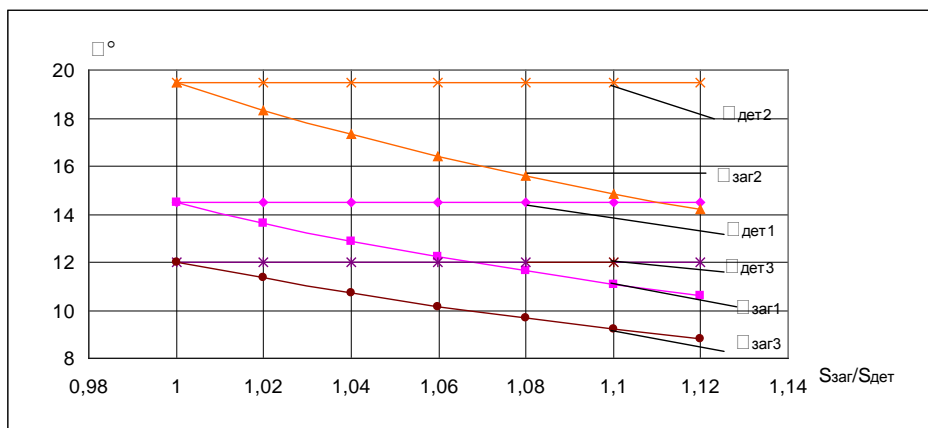


Рисунок 4.18 - Зависимость отношения $S_{заг} / S_{дет}$ от угла конусности заготовки $\alpha_{заг}$ при $\mu = 0,5$ и различных значениях угла конусности детали:

$$\alpha_{дет1} = 14,5^0; \alpha_{дет2} = 19,5^0; \alpha_{дет3} = 12^0$$

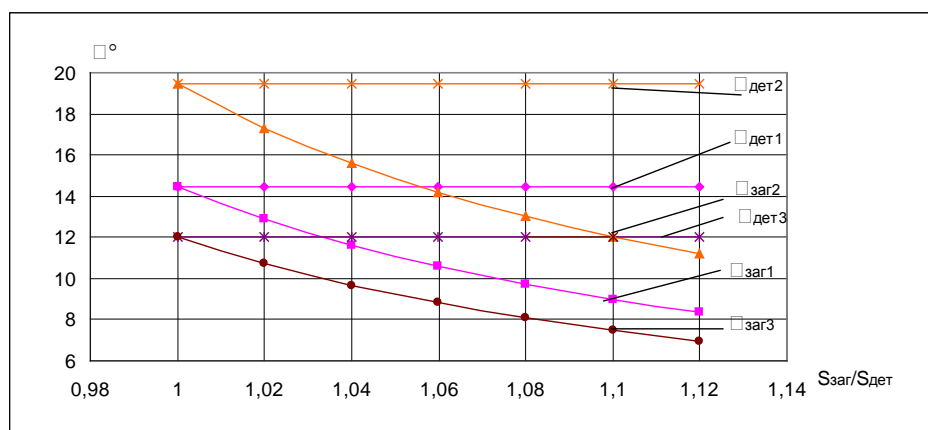


Рисунок 4.19 - Зависимость отношения $S_{заг} / S_{дет}$ от угла конусности заготовки $\alpha_{заг}$ при $\mu = 0,8$ и различных значениях угла конусности детали:

$$\alpha_{дет1} = 14,5^0; \alpha_{дет2} = 19,5^0; \alpha_{дет3} = 12^0$$

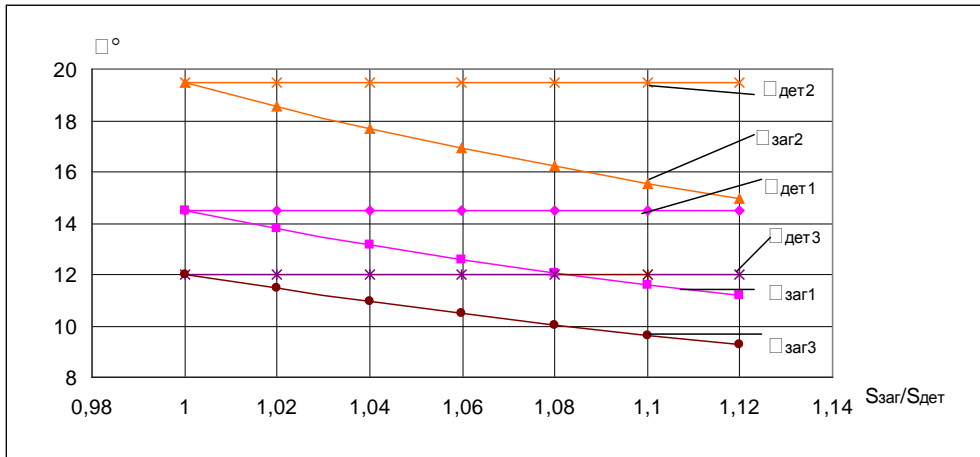


Рисунок 4.20 - Зависимость отношения S_{zag} / S_{det} от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,3$ и различных значениях угла конусности детали: $\alpha_{det1} = 14,5^0$; $\alpha_{det2} = 19,5^0$; $\alpha_{det3} = 12^0$

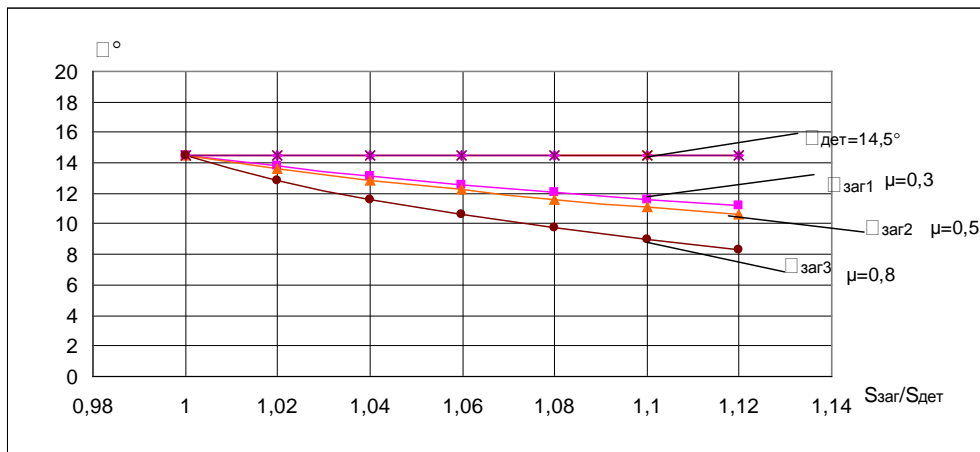


Рисунок 4.21 - Зависимость отношения S_{zag} / S_{det} от угла конусности заготовки α_{zag} при угле конусности детали $\alpha_{det1} = 14,5^0$ и различных значениях коэффициента анизотропии $\mu = 0,3$; $\mu = 0,5$; $\mu = 0,8$

Задаваясь соотношением S_{det} / S_{zag} и различными значениями коэффициента анизотропии, используя формулы (4.36,4.22,4.21,4.12), построим зависимость отношения S_T / S_{zag} (рис. 4.22).

Полученные зависимости позволяют сделать вывод: коэффициент анизотропии оказывает влияние на соотношение толщины детали и заготовки, не изменяя характер построения. Для конической детали получается постоянная толщина вдоль всей длины образующей.

Для подтверждения достоверности теоретического анализа и сделанных выводов проведено компьютерное моделирование процесса отбортовки кони-

ческой оболочки давлением эластичной среды с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе PAM-Stamp 2G (ESI Group).

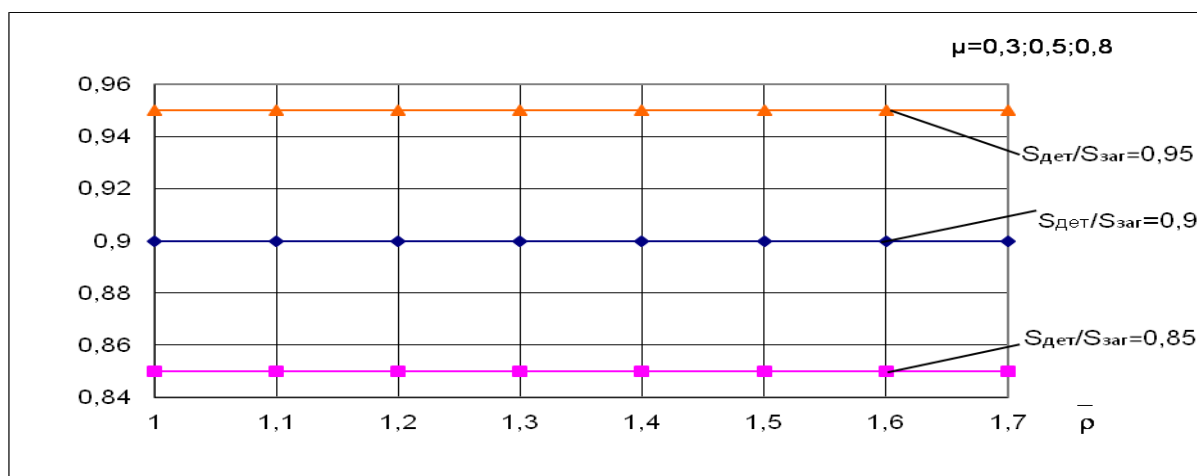
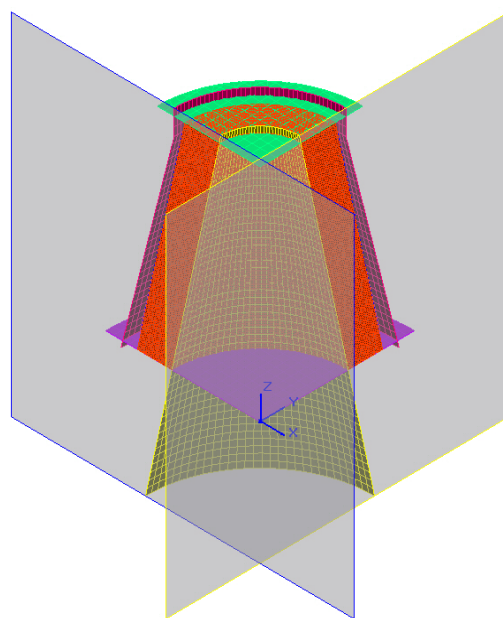
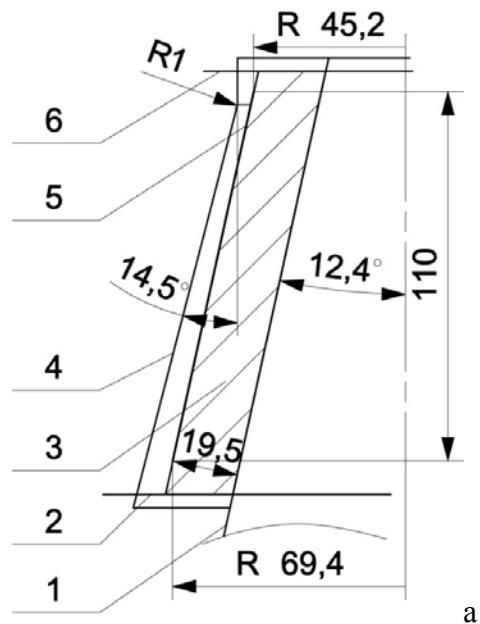


Рисунок 4.22 - Зависимость отношения $S_T / S_{заг}$ по заданному соотношению $S_{дет} / S_{заг}$ и различных значениях коэффициента анизотропии $\mu = 0,3$; $\mu = 0,5$; $\mu = 0,8$

В компьютерную модель процесса (рис. 4.23) входят: эластичная среда 3, конечно-элементная сетка которой сгенерирована с использованием объемных 8-узловых элементов; пуансон 1, матрица 4, нижняя 2 и верхняя 6 подкладки (ограничивают осевое перемещение эластичной среды), а также заготовки 5, конечно-элементные сетки которых сгенерированы с использованием оболочечных 4-узловых элементов. Средняя длина ребра конечного элемента эластичной среды и заготовки составляет 1,73 мм. Для того чтобы сократить количество конечных элементов при решении осесимметричной задачи, моделировалась $\frac{1}{4}$ объема, заключенного между координатными плоскостями ZOY и ZOX (ось OZ совмещалась с осью симметрии), при этом задавались соответствующие граничные условия (ограничения на перемещение узлов, лежащих в плоскости симметрии). Кроме того, задавались дополнительные ограничения степеней свободы: пуансон может перемещаться только вдоль оси Z, поэтому для него ограничивались перемещения вдоль осей X и Y и все повороты, а для неподвижных матрицы, верхней и нижней подкладок убиралась все степени свободы.



б

Рисунок 4.23 - Физическая (а) и конечно-элементная (б) модели процесса отбортовки конической оболочки давлением эластичной среды:

1 - пуансон; 2 - нижняя подкладка; 3 - эластичная среда; 4 - матрица; 5 - заготовка; 6 - верхняя подкладка

Скорость движения пуансона задавалась 5,0 м/с, перемещение до полной отбортовки заготовки – 40 мм. Коэффициент трения между заготовкой и матрицей принимали равным 0,15; между эластичной средой и инструментом - 0,45. С целью исследования влияния трения между заготовкой и эластичной средой на распределение толщины готового изделия соответствующий коэффициент трения принимали равным также 0,23. Материал конической заго-

товки толщиной 0,3 мм - коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т: плотность 7 900 кг/м³; модуль упругости – 195 ГПа; коэффициент Пуассона - 0,3. При моделировании использовалась кривая упрочнения стали 12Х18Н10Т, полученная при испытании на простое растяжение (рис. 4.24).

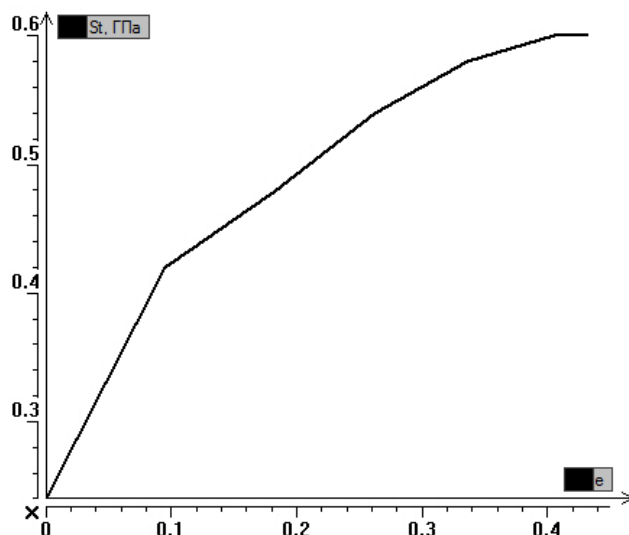


Рисунок 4.24 - Кривая упрочнения коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т

Металлический инструмент (матрицу, подкладки и пуансон) моделировали абсолютно жестким. Для описания поведения эластичной среды, изготовленной из полиуретана СКУ-7Л, использовалась модель Муни-Ривлина, для которой необходимо задать два параметра А и В, однозначно характеризующих значение плотности энергии объемной деформации полиуретана (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Механические свойства и параметры полиуретана СКУ-7Л

Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³	Параметры модели Муни-Ривлина, МПа	
		А	В
0,499	1 250	2,5	4,5

Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе формообразования с коэффициентами трения 0,23 и 0,4 приведено на рис. 4.25. Наибольшее напряжение наблюдается в месте перехода конической части детали в цилиндрическую, при этом, больший коэффициент трения приводит к большим напряжениям (437 МПа против 408 МПа). Кроме того больший коэффициент

коэффициент трения приводит к более значительной неравномерности распределения деформаций по образующей (рис. 4.25, б).

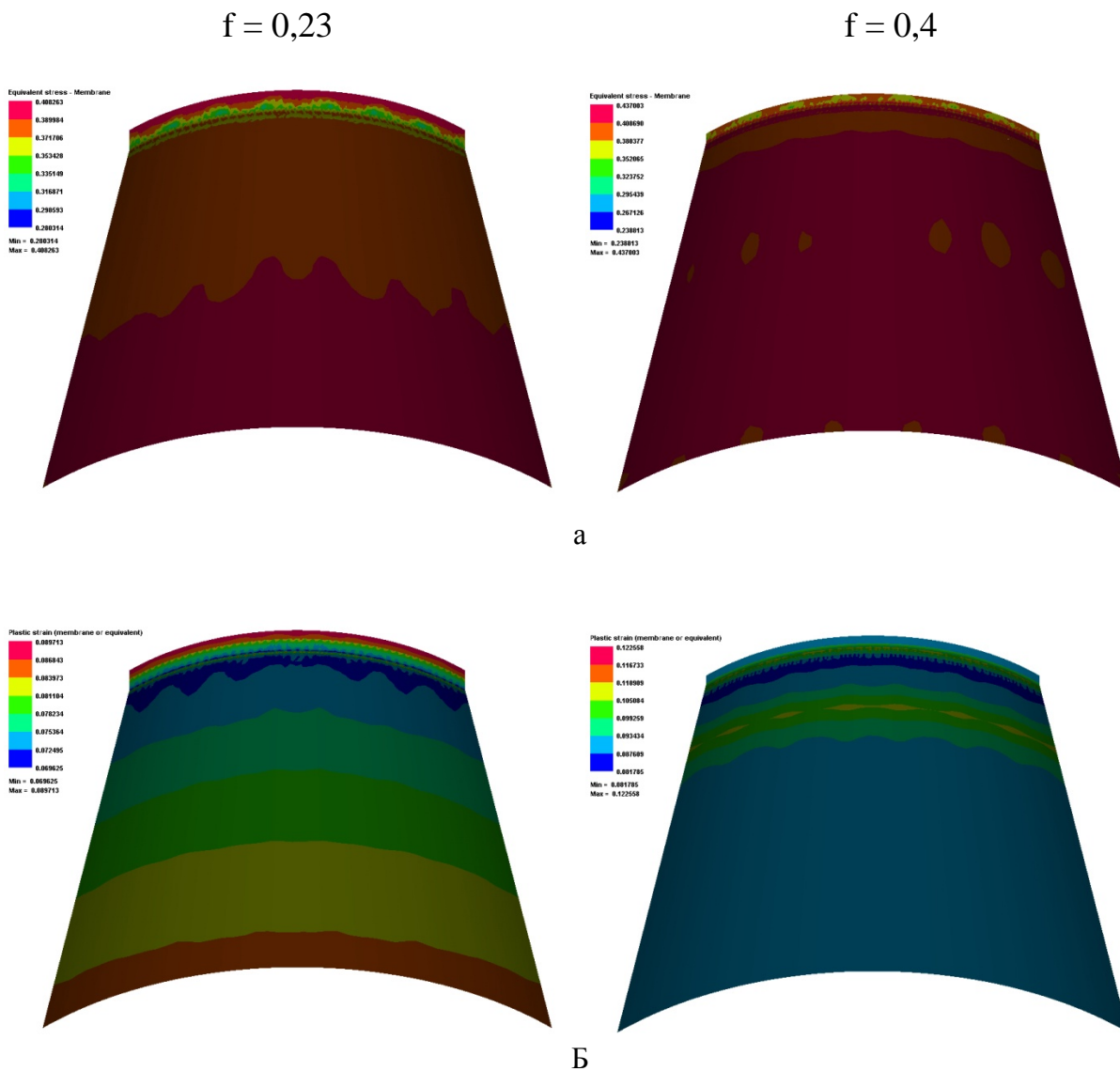


Рисунок 4.25 - Интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) при отбортовке

Как видно из рис. 4.26, в процессе отбортовки происходит укорочение заготовки. При этом укорочение происходит более интенсивно при меньшем коэффициенте трения (5,7 мм против 3,3 мм), что вызвано действием сил трения. При этом при $f = 0,4$ верхний торец смещается навстречу нижнему и наоборот, т.е. на образующей существует область, не испытывающая осевого перемещения.

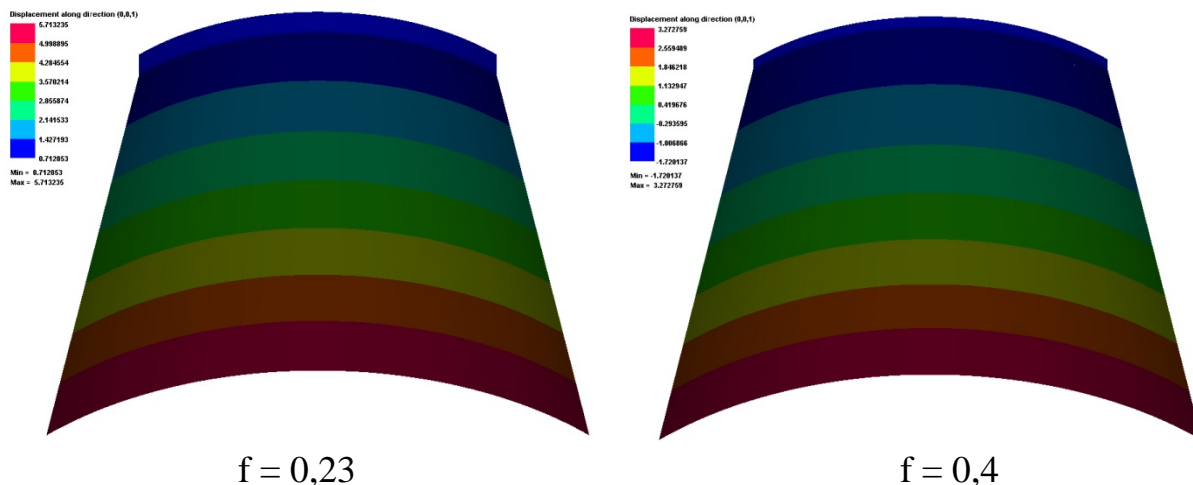


Рисунок 4.26 - Осевое перемещение узлов сетки заготовки

В процессе деформирования усилие на пуансоне линейно увеличивается и достигает максимума в конце процесса (рис. 4.27). При этом больший коэффициент трения вызывает необходимость прикладывать большее усилие (160 кН против 136 кН).

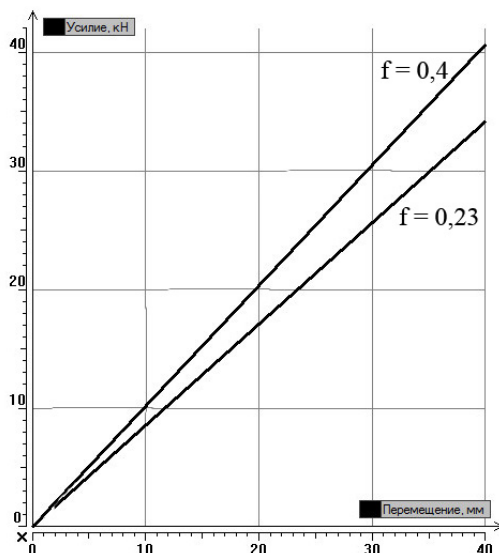


Рисунок 4.27 - Зависимость усилия от перемещения пуансона

Из рис. 4.28 видно, что больший коэффициент трения приводит к большей неравномерности распределения толщины по образующей конической оболочки. При этом наблюдается два минимума – в месте сопряжения цилиндрической и конической частей и в месте изменения направления течения металла.

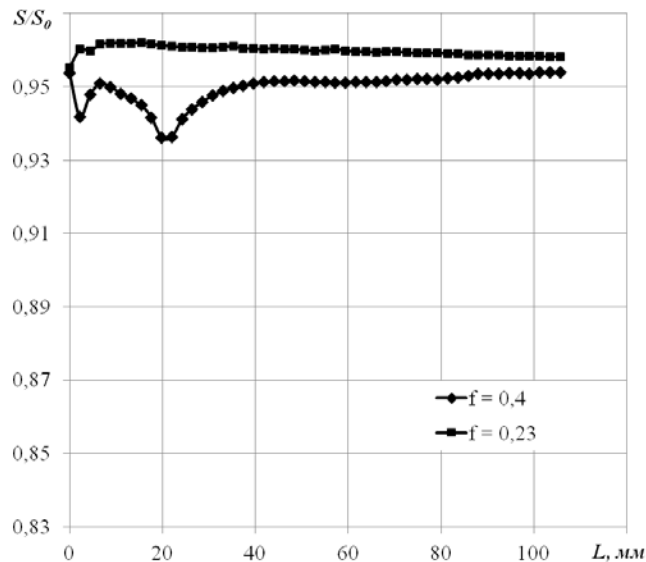


Рисунок 4.28 - Распределение относительной толщины по образующей конической оболочки в зависимости от величины коэффициента трения

В целом влияние коэффициента трения незначительно, т.к. отличие в напряженно-деформированном состоянии составляет не более 1,5%. Таким образом, в диапазоне 0,23-0,4 коэффициентом трения в расчетах можно пренебречь.

4.3 Исследование способа формообразования деталей из цилиндрической заготовки

4.3.1 Исследование способа формообразования деталей усеченной сужающейся формы из цилиндрической заготовки

Будем считать, что при формообразовании цилиндрической заготовки напряжением σ_ρ можно пренебречь. Найдем напряжение со стороны малого конуса детали. Уравнение равновесия (4.7) для конической детали со стороны малого торца имеет вид

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3) = 0. \quad (4.39)$$

Решение (4.39) имеет вид при $\sigma_\theta \cong \sigma_s^* = \sqrt{2} \sqrt{1 - \mu}$ (4.24) и граничном условии при $\rho = r$, $\sigma_\rho = 0$:

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_s^*} = (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3) \left(1 - \frac{1}{\rho} \right), \quad (4.40)$$

где $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r}$.

Уравнение равновесия при условии деформирования $f \geq tg\alpha_1$, со стороны большого торца:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta(1 - f \cdot ctg\alpha_3) = 0. \quad (4.41)$$

Решение (4.41) при граничном условии $\rho = R_{dem}$, $\sigma_\rho = 0$ имеет вид

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_S^*} = (1 - f \cdot ctg\alpha_3) \left(1 - \frac{\bar{R}_{dem}}{\rho} \right),$$

где
$$\bar{R}_{dem} = \frac{R_{dem}}{r_{dem}}. \quad (4.42)$$

Далее найдем сечение с координатой ρ_n , в котором напряжения как со стороны большого, так и малого торца одинаковы.

Приравняв (4.40) и (4.42), получим:

$$(1 - f \cdot ctg\alpha_3) \left(1 - \frac{R_{dem}}{\rho_n} \right) = (1 + f \cdot ctg\alpha_3) \left(1 - \frac{r_{dem}}{\rho_n} \right). \quad (4.43)$$

Отсюда:

$$\bar{\rho}_n = \frac{1 - \bar{R}_{dem} + f \cdot ctg\alpha_3 (1 + \bar{R}_{dem})}{2f \cdot ctg\alpha_3}. \quad (4.44)$$

Найдем среднеинтегральное решение $\frac{\bar{\sigma}_\rho}{\sigma_S^*}$ со стороны малого торца:

$$\frac{\bar{\sigma}_\rho}{\sigma_S^*} = \frac{1 + fctg\alpha_3}{\bar{\rho}_n - 1} (\bar{\rho}_n - 1 - \ln \bar{\rho}_n). \quad (4.45)$$

Используя формулу (4.44) при исходных данных $f=0,3$; $\alpha_3 = 15^\circ$; $\bar{R}_{dem}=1,3$ и рассчитав отношение напряжений по формуле (4.55), получим результат $\frac{\bar{\sigma}_\rho}{\sigma_S^*}=0,016$, что на два порядка меньше значения σ_S^* и позволяет нам принять

схему напряженного состояния линейного растяжения.

Представим уравнение связи в виде

$$1 - \frac{S_T}{S_{заг}} = (1 - \mu) \frac{1 + \frac{\sigma_\rho}{\sigma_S^*}}{1 - \mu \frac{\sigma_\rho}{\sigma_S^*}} \left(1 - \frac{1 - \bar{\Delta}}{\rho} \right), \quad (4.46)$$

где $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{r}$ - наименьший относительный зазор заготовки от матрицы;

$e_s = 1 - \frac{S_T}{S_{заг}}$ - деформация по толщине, $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r_{дем}}$;

$e_\theta = 1 - \frac{1-\Delta}{\rho}$ - деформация тангенциальная.

Так как $\sigma_\rho = 0$, то (4.46) примет вид

$$S_T = S_{заг} \left[1 - (1-\mu) \left(1 - \frac{1-\bar{\Delta}}{\bar{\rho}} \right) \right]. \quad (4.47)$$

Условие минимизации разнотолщинности для конуса примет вид

$$\int_R^1 (S_{дем} - S_T)^2 d\rho \rightarrow \min.$$

С учетом (4.47) получим:

$$\int_R^1 \left[\bar{S}_{дем} - 1 + (1-\mu) \left(1 - \frac{1-\bar{\Delta}}{\bar{\rho}} \right) \right]^2 d\bar{\rho} \rightarrow \min, \quad (4.48)$$

где $\bar{S}_{дем} = \frac{S_{дем}}{S_{заг}}$ - относительная толщина детали.

Если минимизировать уравнение (4.48) по относительной толщине детали, то получим наименьшую разнотолщинность по относительной толщине детали и наименьшее отклонение относительной толщины детали от толщины заготовки:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{S}_{дем}} = 0; \left[(\bar{S}_{демн} - 1) (1 - \bar{R}_{дем} + \ln \bar{R}_{дем}) + (1-\mu) [1 - \bar{R}_{дем} + \ln \bar{R}_{дем} (1 - \bar{\Delta})] = 0 \right]. \quad (4.49)$$

Отсюда находим:

$$\bar{S}_{демн} = 1 - \frac{(1-\mu) [1 - \bar{R}_{дем} + \ln \bar{R}_{дем} (1 - \bar{\Delta})]}{1 - \bar{R}_{дем}}. \quad (4.50)$$

Определим величину относительного радиуса детали \bar{R} при заданной величине утонения кромки:

$$\bar{S}_{демн} - \bar{S}_{демм} = \xi, \quad (4.51)$$

где $\bar{S}_{демн}, \bar{S}_{демм}$ - значения относительных толщин, рассчитанных по формуле (4.50), и минимальных на кромке, рассчитанных по формуле (4.47) при $\bar{\rho} = \bar{R}_{дем}$;

ξ - относительное утонение заготовки.

Подставив (4.47), (4.50) в формулу (4.51), после преобразований имеем:

$$\bar{R}_{дет} = -\frac{0,5 + 1,5\bar{\Delta} - \frac{\xi}{1-\mu}}{1-\bar{\Delta}} + \sqrt{\left[\frac{0,5 + 1,5\bar{\Delta} - \xi/(1-\mu)}{1-\bar{\Delta}}\right]^2 + \frac{2}{1-\bar{\Delta}}}. \quad (4.52)$$

По формуле (4.50) найдем наименьшую толщину детали и рассчитаем по (4.47) отношение толщин $S_T / S_{заг}$ (рис. 4.29, 4.30.).

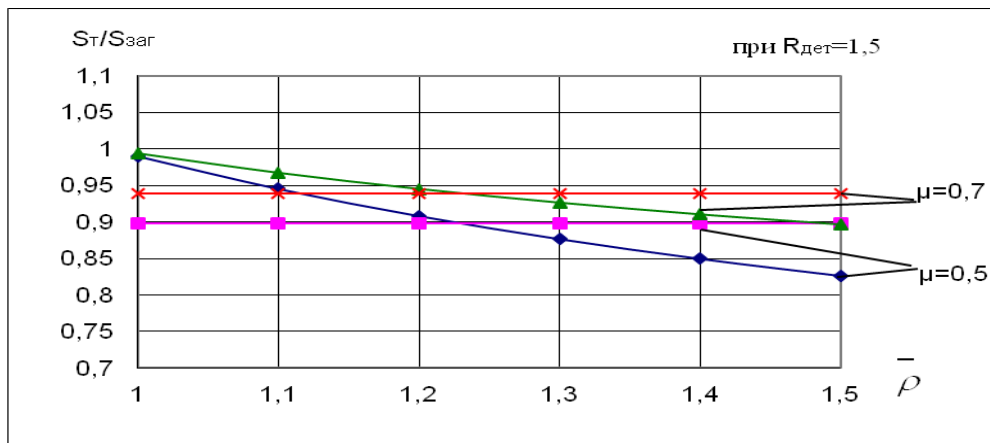


Рисунок 4.29 - Изменение $S_T / S_{заг}$ при увеличении отношения $\bar{\rho}$ для конической детали

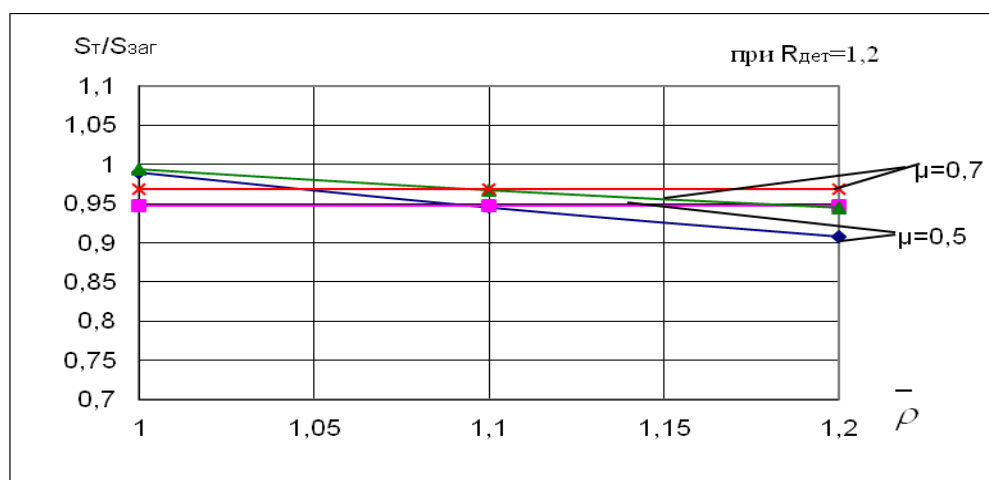


Рисунок 4.30 - Изменение $S_T / S_{заг}$ при увеличении отношения $\bar{\rho}$ для конической детали

Рассмотрим выпуклую деталь (рис. 4.31):

$$\rho = R_{\rho} \cos \alpha_3 - a.$$

Радиус меняется:

$$\frac{R_{\rho}}{r} \cos \alpha_2 - \frac{a}{r} \leq \rho \leq \frac{R_{\rho}}{r} \cos \alpha_1 - \frac{a}{r} \quad \text{или} \quad \bar{R}_{\rho} \cos \alpha_2 - \bar{a} \leq \rho \leq \bar{R}_{\rho} \cos \alpha_1 - \bar{a}.$$

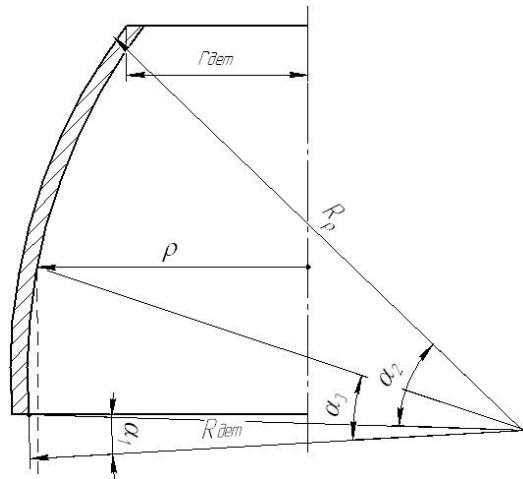


Рисунок 4.31 - Схема формообразования выпуклой детали:

R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении; α_1, α_2 - углы, образованные радиусом R_ρ , проведенным к кромке детали большего или меньшего основания, и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ , перпендикулярной оси симметрии детали; α_3 - угол наклона касательной, проведенной к элементу с координатой радиусом ρ и осью симметрии детали; r_{det} - меньший радиус детали; R_{det} - больший радиус детали; ρ - текущий радиус детали

Ставим пределы интегрирования в уравнение (4.48):

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[\bar{S}_{det} - 1 + (1 - \mu) \left(1 - \frac{1 - \bar{\Delta}}{R_\rho \cos \alpha_3 - a} \right) \right]^2 d\alpha_3 \rightarrow \min, \quad (4.53)$$

$$\frac{d}{dS_{det}} = 0,$$

$$(\bar{S}_{det_n} - 1)(\alpha_2 - \alpha_1) + (1 - \mu) \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \alpha_i (1 - \bar{\Delta})}{R_\rho \cos \alpha_i - a} \right) = 0, \quad (4.54)$$

$$\bar{S}_{det_n} = 1 - \frac{(1 - \mu) \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \alpha_i (1 - \bar{\Delta})}{R_\rho \cos \alpha_i - a} \right)}{\alpha_2 - \alpha_1}, \quad (4.55)$$

где n - число участков очага деформации;

\bar{S}_{det_n} - наименьшее значение толщины.

По формуле (4.55) найдем наименьшую толщину детали и рассчитаем по (4.47) отношение толщин $S_T / S_{заг}$ (рис. 4.32, 4.33, 4.34).

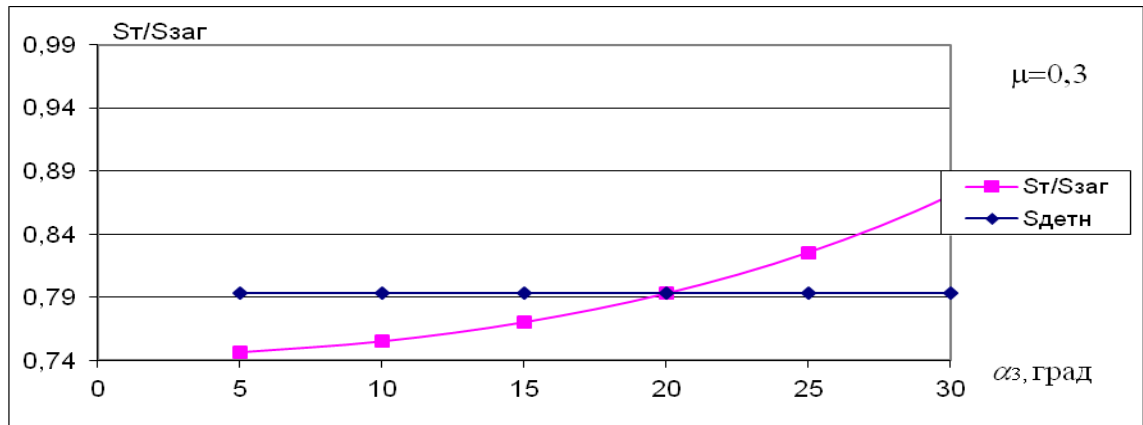


Рисунок 4.32 - Изменение S_T / S_{zag} при увеличении угла α_3 , $\bar{S}_{детн}=0,793$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^0; \alpha_2=35^0; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,3$

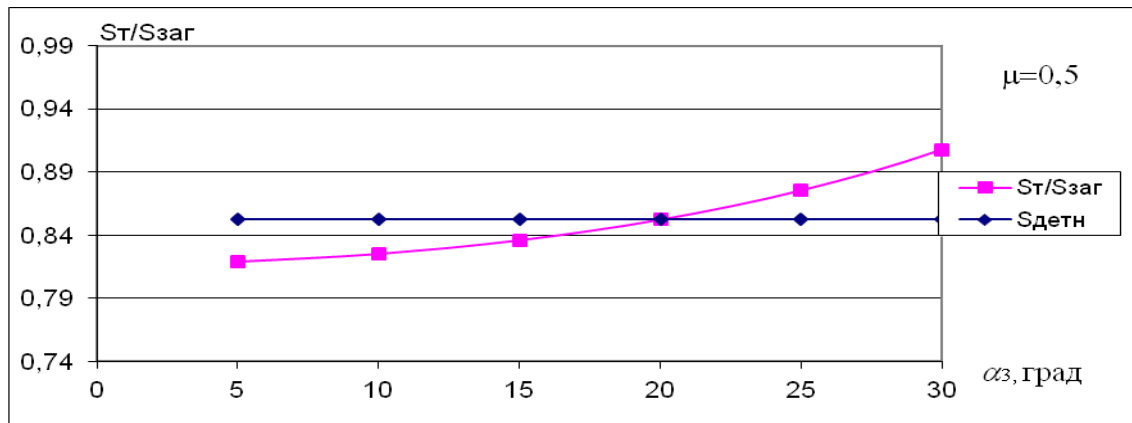


Рисунок 4.33 - Изменение S_T / S_{zag} при увеличении угла α_3 , $\bar{S}_{детн}=0,852$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^0; \alpha_2=35^0; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,5$

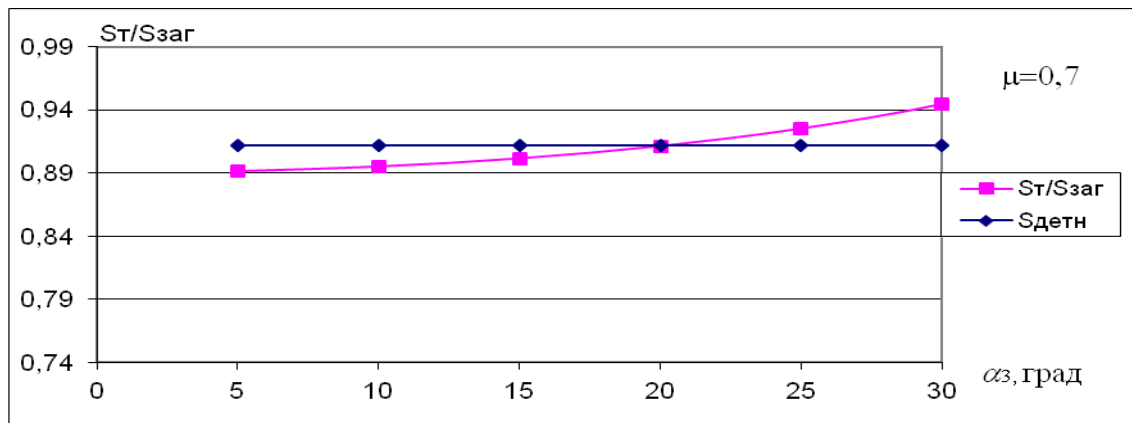


Рисунок 4.34 - Изменение S_T / S_{zag} при увеличении угла α_3 , $\bar{S}_{детн}=0,911$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^0; \alpha_2=35^0; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,7$

Рассмотрим вогнутую деталь (рис. 4.35).

Из геометрии:

$$\rho = R_\rho \cos \alpha_1 + r - R_\rho \cos \alpha_3,$$

$$\bar{\rho} = \bar{R}_\rho (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_3) + 1,$$

$$1 \leq \rho \leq \bar{R}_\rho (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) + 1.$$

Уравнение минимизации запишем:

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[\bar{S}_{дет} - 1 + (1 - \mu) \left(1 - \frac{1 - \bar{\Delta}}{\bar{R}_\rho (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) + 1} \right) \right]^2 d\alpha_3 \rightarrow \min.$$

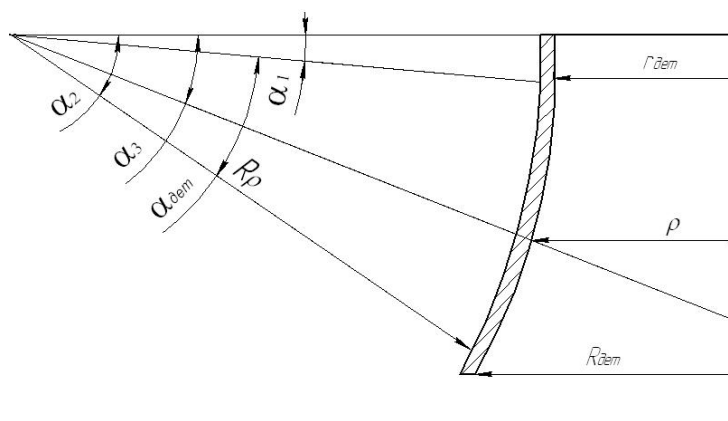


Рисунок 4.35 - Схема формообразования вогнутой детали

После интегрирования:

$$(\bar{S}_{дет} - 1)(\alpha_2 - \alpha_1) + (1 - \mu) \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \alpha_i (1 - \bar{\Delta})}{\bar{R}_\rho (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_i) + 1} \right) = 0.$$

Отсюда:

$$\bar{S}_{детн} = 1 - \frac{(1 - \mu) \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \alpha_i (1 - \bar{\Delta})}{\bar{R}_\rho (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_i) + 1} \right)}{\alpha_2 - \alpha_1}. \quad (4.56)$$

По формуле (4.56) найдем наименьшую толщину детали и рассчитаем по (4.47) отношение толщин $S_T / S_{заг}$ (рис. 4.36 -4.38).

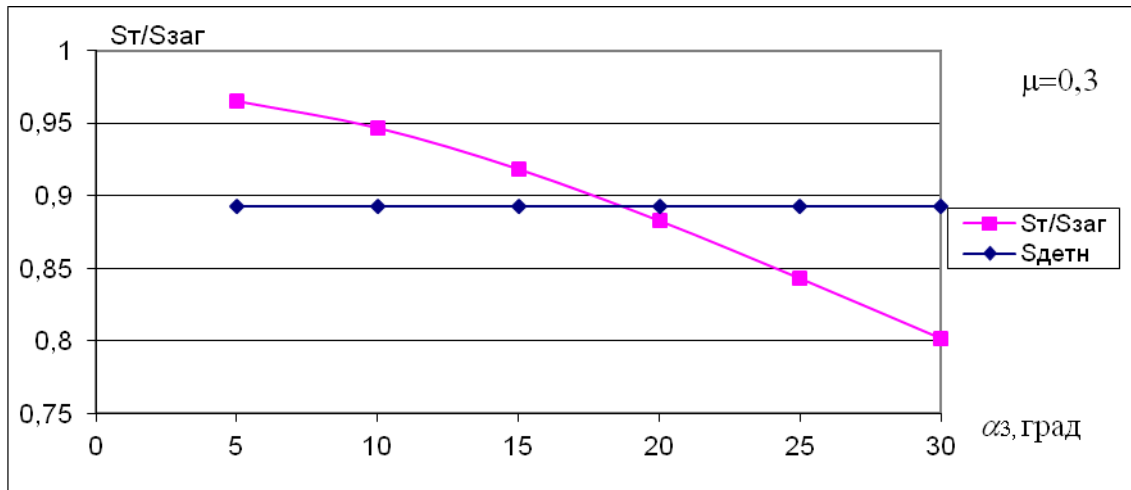


Рисунок 4.36 - Изменение S_T / S_{zag} при увеличении угла α_3 , $\bar{S}_{детн}=0,893$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^0; \alpha_2=35^0; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,3$

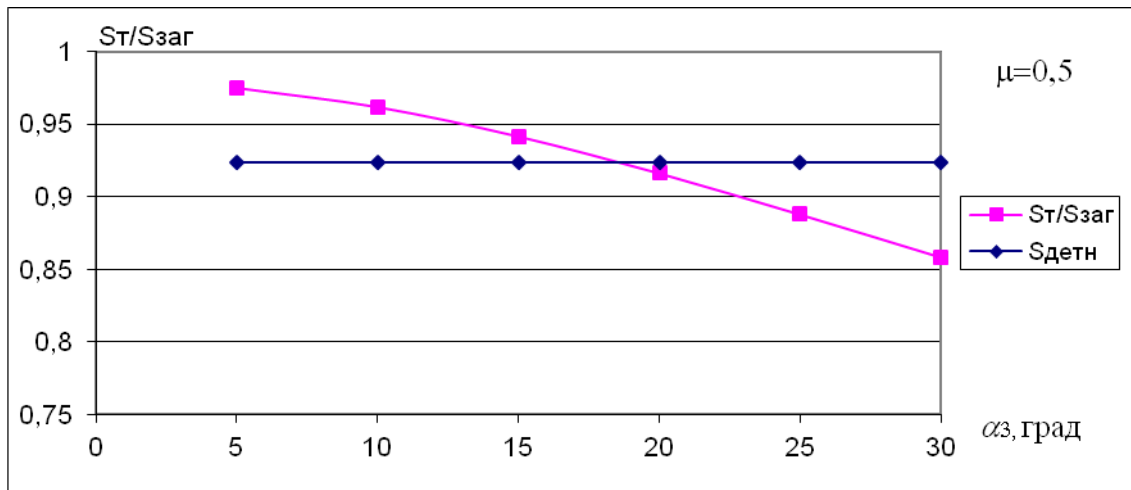


Рисунок 4.37 - Изменение S_T / S_{zag} при увеличении угла α_3 , $\bar{S}_{детн}=0,923$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^0; \alpha_2=35^0; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,5$

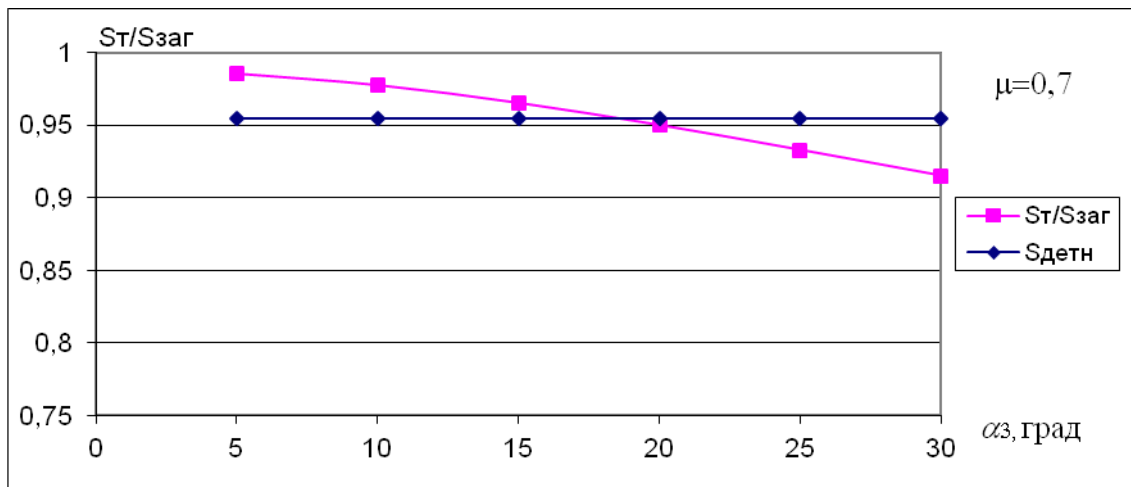


Рисунок 4.38 - Изменение S_T / S_{zag} при увеличении угла α_3 , $\bar{S}_{детн}=0,954$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^0; \alpha_2=35^0; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,7$

4.3.2 Исследование способа формообразования деталей бочкообразной формы из цилиндрической заготовки

Для создания условий, обеспечивающих возможность получения детали с минимальной разнотолщинностью, необходимо выполнить компоновку (см. рис. 4.8) с равенством объемов:

$$V_1 = V_2,$$

где V_1 - объем, заключенный между внутренней поверхностью заготовки, раздвижными секторами и двумя эластичными элементами;

V_2 - объем, заключенный между рабочими поверхностями двух матриц и наружной поверхностью цилиндрической заготовки.

$$V_1 = V_{1,1} + V_{1,2},$$

где $V_{1,1}$ - объем, заключенный между внутренней поверхностью заготовки, раздвижными секторами, верхним эластичным элементом и границей смыкания двух матриц;

$V_{1,2}$ - объем, заключенный между внутренней поверхностью заготовки, раздвижными секторами, нижним эластичным элементом и границей смыкания двух матриц.

Определяющим параметром является расстояние между двумя эластичными элементами - высота h_1 . Угол α выбирается из конструктивных соображений (из возможного хода оборудования, размеров детали и закрытой высоты прессы). Важным является выполнение условия в компоновке: оба эластичных элемента в момент их сжатия должны находиться на уровне смыкания матриц. Необходимо учесть особенность деформирования элементов: в заключительной стадии она не должна превышать 25% степени деформации,

Согласно геометрии запишем:

$$\frac{V_{1,1}}{2} = \frac{\pi D_{заг}^2}{16} \cdot \left(\frac{H_{заг}}{2} - h_e \right) - \frac{\pi}{16} \frac{\left(\frac{H_{заг}}{2} - h_e \right)}{\cos \alpha} \left[d_0 - \left(\frac{H_{заг}}{4} + \frac{h_e}{2} \right) \right]^2, \quad (4.57)$$

где $H_{заг}$ - высота заготовки;

$D_{заг}$ - диаметр цилиндрической заготовки;

d_0 - диаметр раздвижных секторов по линии смыкания матриц;

h_6 - расстояние от линии смыкания двух матриц до верхнего эластичного элемента 3.

Для расчетов задаемся высотой верхнего эластичного элемента 3 и определим диаметр d_0 :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\frac{\pi D_{3a2}^2}{16} \left(\frac{H_{3a2}}{4} - \frac{h_6}{2} \right) - \frac{V_2}{2}}{\frac{\pi}{16} \frac{\left(\frac{H_{3a2}}{2} - h_6 \right)}{\cos \alpha}} + \frac{H_{3a2}}{4} + \frac{h_6}{2}}. \quad (4.58)$$

Для определения расстояния от линии смыкания двух матриц до нижнего эластичного элемента 4 h_n запишем:

$$\frac{V_{1,2}}{2} = \frac{\pi D_{3a2}^2}{16} \cdot \left(\frac{H_{3a2}}{2} - h_n \right) - \frac{\pi}{16} \frac{\left(\frac{H_{3a2}}{2} - h_n \right)}{\cos \alpha} \left[d_0 + \frac{H_{3a2}}{4} \operatorname{tg} \alpha \right]^2, \quad (4.59)$$

$$h_n = \frac{H_{3a2}}{2} - \frac{8V_2}{\pi \left(D_{3a2}^2 - \frac{1}{\cos \alpha} \left[d_0 + \frac{H_{3a2}}{4} \operatorname{tg} \alpha \right]^2 \right)}. \quad (4.60)$$

Определим объем V_2 из геометрии получаемой детали:

$$\frac{V_2}{2} = \pi R_\rho^3 \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha_2 \right) - 2\pi R_\rho^2 a \sin \alpha_2 + \pi R_\rho a^2 \alpha_2 - \frac{\pi D_{3a2}^2}{8} H_{3a2}, \quad (4.61)$$

где R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении;

a - расстояние от центра радиуса R_ρ до оси симметрии;

α_2 - угол, образованный радиусом R_ρ , проведенным к кромке детали меньшего основания, и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали.

Для проведения анализа формообразования выпуклой и вогнутой деталей бочкообразной формы (рис. 4.39, 4.40) в случае отсутствия трения (или очень малых значениях коэффициентов трения) воспользуемся формулами (4.47), (4.55), (4.56). Для вогнутой детали учтем:

$$\bar{R}_\rho = \frac{\bar{R}_{дет} - 1}{1 - \cos \alpha_2}. \quad (4.62)$$

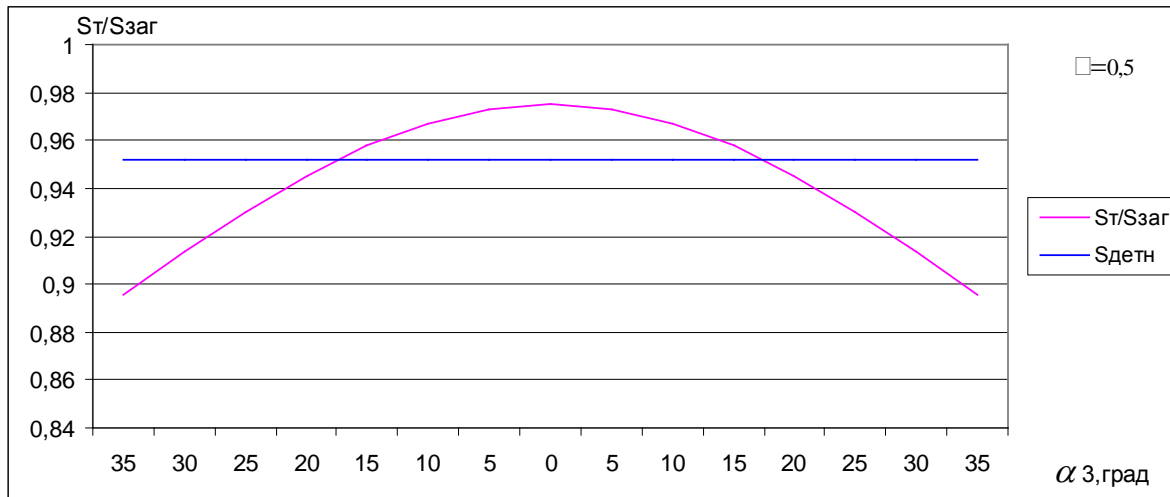


Рисунок 4.39 - Изменение S_T / S_{zag} при увеличении угла α_3 , $\bar{S}_{детн} = 0,952$ и геометрических параметрах вогнутой детали $\bar{R}_{дет} = 1,2$; $\alpha_1 = 0^0$; $\alpha_2 = 35^0$; $\bar{\Delta} = 0,05$; $\mu = 0,5$; $R_\rho = 1,1$

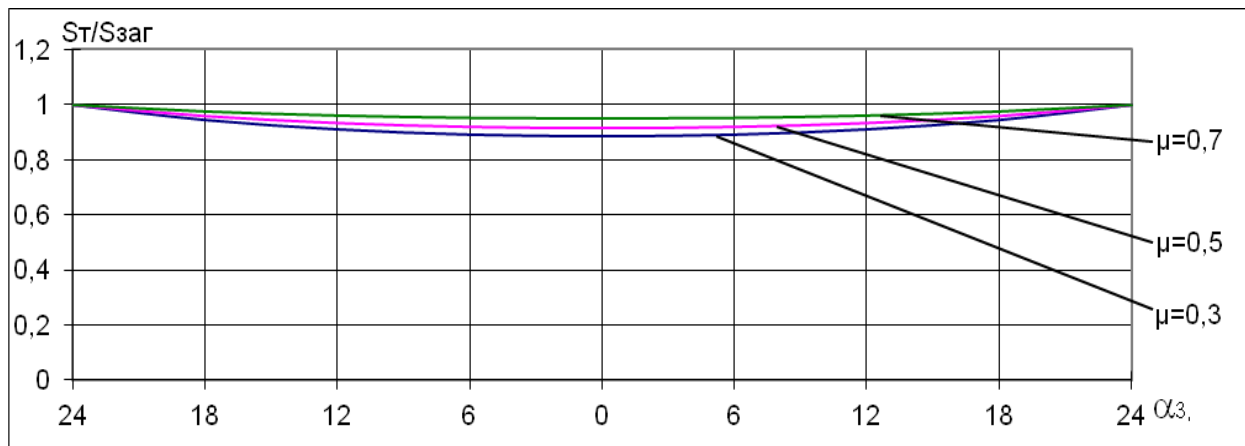


Рисунок 4.40 - Изменение S_T / S_{zag} при увеличении угла α_3 и геометрических параметрах детали бочкообразной формы $R_\rho = 2,3$; $\bar{R}_{дет} = 1,2$; $\bar{\Delta} = 0$; $\alpha_2 = 24^0$

В дальнейшем рассмотрим случай, когда возникает трение и влияние его значимо. Из геометрии (рис. 4.41) при $\alpha_1 = 0$:

$$r = R_\rho \cos \alpha_2 - a, \quad (4.63)$$

$$R_\rho = a + R_{дет},$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{1 + \bar{a}}{\bar{R}_{дет} + \bar{a}}, \quad (4.64)$$

где $\bar{R}_{дет} = \frac{R_{дет}}{r_{дет}}$, $\bar{a} = \frac{a}{r_{дет}}$.

+ - вогнутая деталь;

- - выпуклая деталь.

Запишем последнее выражение в виде

$$\frac{d\sigma_\rho}{\sigma_\rho \left(1 \mp \frac{f\rho}{R_\rho \sin \alpha_3} \right) - \sigma_S^* (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_3)} = -\frac{d\rho}{\rho}. \quad (4.67)$$

Примем переменные при коэффициенте трения за среднее значение и постоянными. После интегрирования имеем:

$$\frac{1}{1 - \frac{f \cdot \rho_c}{R_\rho \sin \alpha_{3c}}} \ln \left[\left(1 \mp \frac{f \cdot \rho_c}{R_\rho \sin \alpha_{3c}} \right) \sigma_\rho - \sigma_S^* (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{3c}) \right] = -\ln \rho + C,$$

где α_{3c} - средний угол, равный:

$$\alpha_{3c} = \alpha_2 / 2. \quad (4.68)$$

Постоянную интегрирования найдем из условия: $\rho = r$; $\sigma_\rho = 0$:

$$C = \ln|r| + \ln \left[-\sigma_S^* (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{3c}) \right]^{1 \mp \frac{f \cdot \rho_c}{R_\rho \sin \alpha_{3c}}}. \quad (4.69)$$

Обозначим:

$$1 \mp \frac{f \cdot \rho_c}{R_\rho \sin \alpha_{3c}} = m = \operatorname{const}, \quad (4.70)$$

где $\rho_c = R_\rho \cos \alpha_{3c} - a$.

После преобразований решение примет вид

$$\sigma_\rho = \frac{1}{m} \sigma_S^* (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_{3c}) \left(1 - \left(\frac{r}{\rho} \right)^m \right). \quad (4.71)$$

Запишем уравнение связи:

$$\left(1 - \frac{S_T}{S_{заг}} \right) = (1 - \mu) \frac{1 + \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}}{1 - \mu \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}} \left(1 - \frac{r}{\rho} \right) \quad (4.72)$$

или

$$S_T = S_{заг} \left[1 - (1 - \mu) \frac{1 + \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}}{1 - \mu \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}} \left(1 - \frac{r}{\rho} \right) \right]. \quad (4.73)$$

Разложим отношение $\frac{1 + \sigma_\rho / \sigma}{1 - \mu \sigma_\rho / \sigma}$ в ряд Тейлора при $\frac{r}{\rho} = 1$ для первых двух членов:

$$\frac{1 + \sigma_\rho / \sigma}{1 - \mu \sigma_\rho / \sigma} = 1 + (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_{3c})(1 - \mu) \left[1 - \frac{r}{\rho} \right]. \quad (4.74)$$

С учетом выражения (4.73) запишем уравнение (3.5):

$$\int_0^{\alpha_2} (S_{\text{дем}} - S_T) d\alpha_3 \rightarrow \min,$$

$$\int_0^{\alpha_2} \left(\bar{S}_{\text{дем}} - 1 + (1 - \mu) + \left[1 + (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_{3c})(1 - \mu) \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}} \right) \right] \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}} \right) \right)^2 d\alpha_{3c} \rightarrow \min,$$

где $\bar{S}_{\text{дем}} = \frac{S_{\text{дем}}}{S_{\text{заг}}}$, $\bar{\rho} = \frac{1}{\rho}$.

Варьируем выражение по толщине заготовки:

$$\int_R^1 \left[\bar{S}_{\text{дем}} - 1 + (1 - \mu) \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}} \right) - (1 - \mu)^2 (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{3c}) \left(\frac{1}{\bar{\rho}} - 1 \right)^2 \right] d\bar{\rho} = 0. \quad (4.75)$$

Отсюда находим:

$$\bar{S}_{\text{демн}} = 1 - \frac{(1 - \mu) \left(1 - \bar{R}_{\text{дем}} + \ln \bar{R}_{\text{дем}} \right) + (1 - \mu)^2 (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{3c}) \left(2 \ln \bar{R}_{\text{дем}} - \bar{R}_{\text{дем}} + \frac{1}{\bar{R}_{\text{дем}}} \right)}{1 - \bar{R}_{\text{дем}}} \quad (4.76)$$

Используя формулы (4.71), (4.74), (4.73), рассчитаем отношение толщин $S_T / S_{\text{заг}}$ (рис. 4.42).

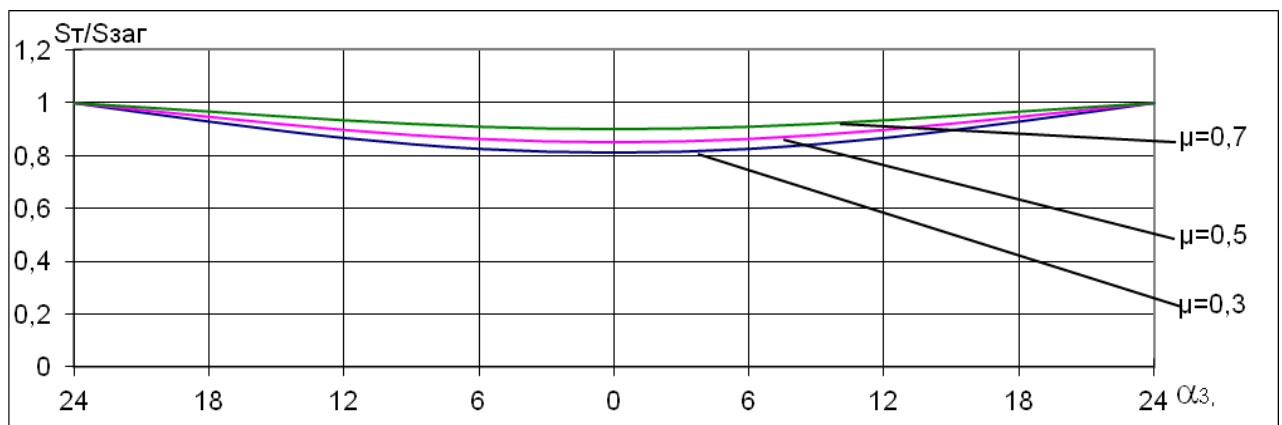


Рисунок 4.42 - Изменение $S_T / S_{\text{заг}}$ от угла α_3 для геометрических параметров детали бочкообразной формы $R_\rho = 2,3$; $\bar{R}_{\text{дем}} = 1,2$; $f = 0,3$

Определим возможность формообразования по предложенному способу (см. рис. 4.8). Рассмотрим схему действия сил в области зазора между подвижными секторами (рис. 4.43).

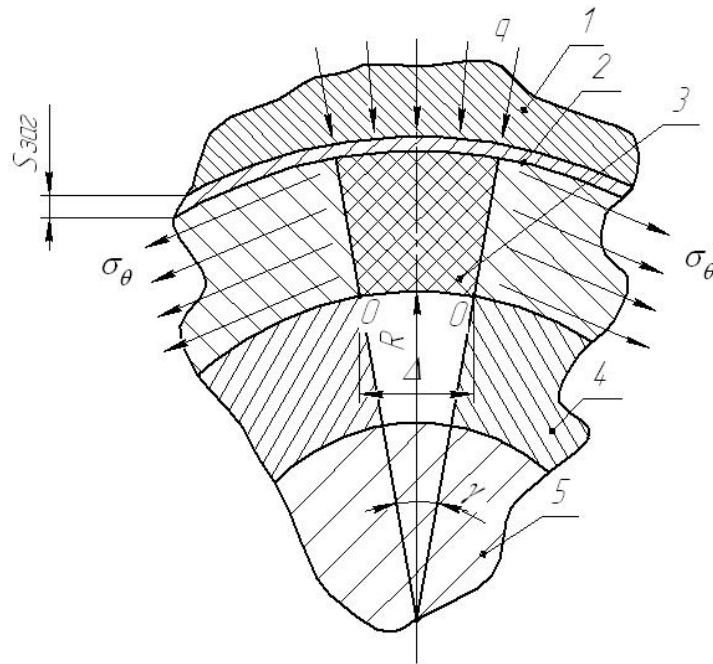


Рисунок 4.43 - Схема действия сил на эластичный элемент в области зазора между подвижными секторами:

1 - матрица; 2 - заготовка; 3 - эластичный элемент; 4 - раздвижные сектора; 5 - конус; Δ - зазор между секторами; γ - угол наклона; R - радиус до наружной поверхности секторов; $S_{эл}$ - толщина эластичного элемента; $S_{заг}$ - толщина заготовки; σ_{θ} - тангенциальное напряжение растяжения эластичного элемента; q - суммарное давление на эластичный элемент

Чтобы эластичный элемент не продавливался в зазор Δ , необходимо соблюдать равенство моментов от действия растягивающих и сжимающих сил от самого эластичного элемента, а также заготовки и матрицы относительно сечений, перпендикулярных плоскости чертежа и проходящих через точки «0»:

$$\mu_P = \mu_{СЖ}, \quad (4.77)$$

где μ_P , $\mu_{СЖ}$ - изгибающие моменты соответственно от растягивающих и сжимающих сил на единицу ширины.

В первом случае имеем:

$$\mu_P = 2\sigma_{\theta,эл.} \cdot S_{эл.} \cdot \cos \gamma \cdot \frac{S_{эл}}{2}, \quad (4.78)$$

Во втором случае:

$$\mu_{СЖ} = q \cdot \Delta \cdot \frac{\Delta}{2}. \quad (4.79)$$

Суммарное давление равно (согласно принципу суперпозиции):

$$q = q_1 + q_2 + q_3, \quad (4.80)$$

где q_1 - давление заготовки на эластичный элемент;

q_2 - давление матрицы через заготовку на эластичный элемент, $[q_1] \leq 0,1$ кг/мм².

Составляющая сжатия от напряжения растяжения эластичного элемента:

$$q_3 = \sigma_{\theta,эл} \sin \frac{\gamma}{2},$$

где $\gamma = \arctg \left| \frac{\Delta}{2R} \right|$.

Из уравнения Лапласа [60]:

$$q_1 = \frac{S_{заг}}{R_{заг}} \sigma_{\theta_{заг}}, \quad (4.81)$$

где $R_{заг}$ - радиус заготовки;

$\sigma_{\theta_{заг}}$ - тангенциальное напряжение растяжения в заготовке.

С учётом выражений (4.77), (4.78), (4.79), (4.80) равенство 4.81 примет вид

$$\sigma_{\theta_{эл}} \cdot \cos \gamma \cdot S_{эл}^2 = \left(q_1 + \frac{S_{заг}}{R_{заг}} \sigma_{\theta_{заг}} + \sigma_{\theta_{эл}} \sin \frac{\gamma}{2} \right) \frac{\Delta^2}{2}. \quad (4.82)$$

Пример: Рассматриваются тонкостенные заготовки для наружной оболочки ЖРД НК33 $\frac{S_{заг}}{2R} \leq 0,002$; $\sigma_{\theta_{заг}} < 60$ кг/мм при деформациях менее 10%.

При числе подвижных секторов от 6 до 8 относительная величина зазора составит $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{R} \leq 0,0325$, угол $\gamma \leq 2^0$. Тогда можно считать $\cos \gamma \approx 1$; $\sin \frac{\gamma}{2} \approx 0$. Примем относительную толщину резины равной величине $\Delta / S_{эл} \leq 0,2$. Из выражения (4.82) имеем:

$$\sigma_{\theta_{эл}} \geq (0,16 + 0,002 \cdot 60) 0,02 \geq 0,0056 \text{ кг/мм}^2.$$

Практически большинство сортов резины имеют величины напряжений при растяжении на 10% больше, чем полученные значения. Так, при модуле

упругости резины $E_{PEЗ} \approx 0,3 \text{ кг/мм}^2$, получим $\sigma_{\theta.л.} = 0,035 \text{ кг/мм}^2$. Пример говорит о том, что за счет тангенциальных напряжений растяжения, продавливания в зазор резины не происходит.

5 Выбор способа формообразования, последовательность проектирования и расчет технологического процесса тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся и бочкообразной формы в условиях схемы напряженного состояния плоского растяжения

В основу выбора следует брать конструктивно-геометрические признаки детали (см. рис. 1.1) и технические условия (цельноштамповочная деталь, сварная деталь, количество сварных швов и т.п.).

5.1 Проектирование из кольцевой заготовки

Для относительно невысоких деталей $H/D \leq 0,3$ целесообразно применять кольцевую плоскую заготовку. Причем для крупных деталей $D \geq 800 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ возможно использование сварной кольцевой заготовки из сегментов в разных количествах: двух, трех и т.д. Способ, представленный на рисунке (см. рис. 2.1), является единственным в случае, когда требуется деталь без наличия швов. Для расчета размеров кольцевой заготовки применяем формулу (2.7). Усилие процесса определим:

$$P = 2\sigma_{\rho} \pi \cdot R \cdot S_{\text{заг}} \sin \alpha_{\kappa}, \quad (5.1)$$

где R - наибольший радиус детали;

σ_{ρ} - напряжения в зоне наибольшего радиуса отбортовки (см. формулу 2.10);

α_{κ} - угол конусности детали в зоне наибольшего радиуса;

$S_{\text{заг}}$ - толщина заготовки.

Величина пружинения вычисляется по формуле (2.19).

Для получения бесшовных деталей относительной высоты $H/D \leq 0,45$ предложен способ (см. рис. 2.8). В нем реализуются последовательно процессы формовки и отбортовки. При этом высота детали зависит от величины утонения и числа переходов с промежуточным отжигом. Способ позволяет получить бесшовные детали не только любой высоты, но и с минимальной разнотолщинностью, используя условие (3.5). В качестве заданной толщины принимается толщина кромки. В условиях схемы напряженно-деформированного состояния близкой к линейной:

$$e_{\theta_{\text{кромки}}} = -2e_s$$

или
$$S_{\text{зад}} = S_{\text{заг}} \sqrt{\frac{r_0}{r_{\text{кромки}}}}, \quad (5.2)$$

где $r_0, r_{\text{кромки}}$ - радиусы кромок отверстия и детали.

Если принять условие (2.22), получим:

$$S_{\text{зад}} = S_{\text{заг}} \exp(-\delta_p). \quad (5.3)$$

Учитывая, что $f_1 = f = 0$ при формовке, $B = 0$; $A = 1 - \mu$, то выражение (3.50) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial \sigma_{\rho}^*} \int_{x_0}^{1_0} \left[\frac{\sigma_{T_0} \sqrt{1 - \mu^2}}{\Pi} + 1 - b - \frac{\sigma_{\rho}^* (1 - \mu^2)}{\Pi} \frac{x}{1 - (1 - \mu)x} \right]^2 dx = 0, \quad (5.4)$$

где $x_0 = \frac{R_0}{R}$ (см. рис. 2.8), $\frac{S_{\text{зад}}}{S_{\text{заг}}} = b$.

Приведем (5.4) к виду

$$\int_0^{x_0} \left[B - \sigma_{\rho}^* \frac{(1 - \mu^2)x}{\Pi[1 - (1 - \mu)x]} \right] \frac{(1 - \mu^2)}{\Pi} \frac{xdx}{1 - (1 - \mu)x} = 0, \quad (5.5)$$

где $B = \frac{\sigma_{T_0} \sqrt{1 - \mu^2}}{\Pi}$.

Из выражения (5.5) определяем:

$$\sigma_{\rho}^* = \frac{\Pi \sum_{i=1}^N \frac{x_i \Delta x_i}{1 - (1 - \mu)x_i}}{1 - \mu^2 \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2 \Delta x_i^2}{(1 - (1 - \mu)x_i)^2}}, \quad (5.6)$$

где N - число участков заготовки, подвергнутых формовке.

Размеры заготовки по способу формовки-отбортовки определяются по формуле (2.7) при $S'_{cp} = S_{зад}$. Усилие формовки находится по формулам (5.1), (3.40), отбортовки – (5.1), (2.10).

5.2 Проектирование из конусной сварной заготовки с использованием процесса формовки

Для относительно высоких деталей $H/D \geq 0,45$ целесообразно применять коническую сварную заготовку. Для крупных деталей $D \geq 1000 \cdot 10^{-3}$ м с малым углом конусности и отношением $D/d \leq 1,5$ наиболее приемлемым является способ отбортовки-формовки (см. рис. 3.1; 3.5). Особенность таких способов состоит в том, что дополнительное давление от эластичной среды приводит к росту активных сил трения между заготовкой и пуансоном. Однако требуется отсутствие трения либо его минимальное значение активного действия (см. рис. 3.24) между заготовкой и эластичным элементом. Рассмотренные способы позволяют получать детали с минимальной разнотолщиной. Для рассмотренных способов (см. рис. 3.2; 3.3; 3.4) технологические параметры рассчитывают в следующей последовательности.

5.2.1 Определение размеров конической заготовки

Для получения детали необходимо использовать коническую заготовку, размеры которой вычисляются в зависимости от размеров готовой детали: $D_{заг}$, $d_{заг}$, $\alpha_{заг}$ (рис. 5.2).

Для выпуклой детали в первую очередь определяется угол конусности исходной заготовки. Он равен углу наклона, образованного касательной, проведенной к кромке детали у меньшего основания (рис.5.1).

Размеры заготовки по меньшему диаметру $d_{заг}$ и большему диаметру $D_{заг}$ находятся с учетом припуска под зажимы:

$$d_{заг} = d + 2(7 \div 12)S_{заг} \sin \alpha_{заг}, \quad D_{заг} = D + 2(7 \div 10)S_{заг} \sin \alpha_{заг}, \quad (5.7)$$

где D - диаметр большого основания детали;
 d - диаметр меньшего основания детали;
 $\alpha_{заг}$ - угол конусности заготовки.

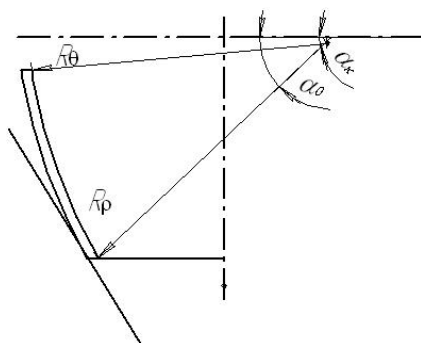


Рисунок 5.1 - Деталь выпуклой формы

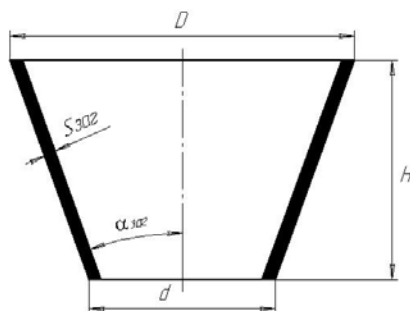


Рисунок 5.2 - Геометрическая схема конической заготовки

Сама же толщина заготовки определяется из условия постоянства объема заготовки и детали:

$$\begin{aligned}
 V_{дет} &= V_{заг}, \\
 F_{дет} S_{заг} &= F_{заг} S_{дет}, \\
 S_{заг} &= \frac{F_{дет} S_{дет}}{F_{заг}}, \tag{5.8}
 \end{aligned}$$

где $F_{дет}$ - площадь детали по срединной поверхности;

$F_{заг}$ - площадь заготовки без учета припусков под зажимы.

Выделим элементарный участок, определенный размерами dl , dp , $d\alpha$ (см. рис. 3.25), и найдем площадь детали. Из геометрии видно:

$$R_p = a + R = Od = const,$$

$$Kd = R_p - OK = R_p - \frac{a}{\cos \alpha},$$

$$\rho = (Kd)\cos\alpha = \left(R_\rho - \frac{a}{\cos\alpha}\right)\cos\alpha = R_\rho \cos\alpha - a, \quad (5.9)$$

$$dl = R_\rho d\alpha. \quad (5.10)$$

С учетом полученных соотношений

$$F_{дет} = 2\pi \int_{\alpha_0}^{\alpha_k} \rho \cdot dl = 2\pi \int_{\alpha_0}^{\alpha_k} (R_\rho \cos\alpha - a) R_\rho d\alpha = 2\pi R_\rho [R_\rho (\sin\alpha_0 - \sin\alpha_k) - a \cdot (\alpha_0 - \alpha_k)]. \quad (5.11)$$

Площадь заготовки определяется согласно рисунку (см. рис. 5.2):

$$F_{заг} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4 \sin\alpha_{заг}}. \quad (5.12)$$

Для получения детали заданных размеров необходимо знать перемещение пуансона (рис. 5.3):

$$\Delta h = h_{дет} - h_0, \quad (5.13)$$

где Δh - перемещение пуансона;

h_0 - высота заготовки;

$h_{дет}$ - высота детали.

$$h_0 = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2}\right) / \operatorname{tg}\alpha_{заг}, \quad (5.14)$$

$$h_{дет} = R_\rho \sin\alpha_0 - R_\rho \sin\alpha_k. \quad (5.15)$$

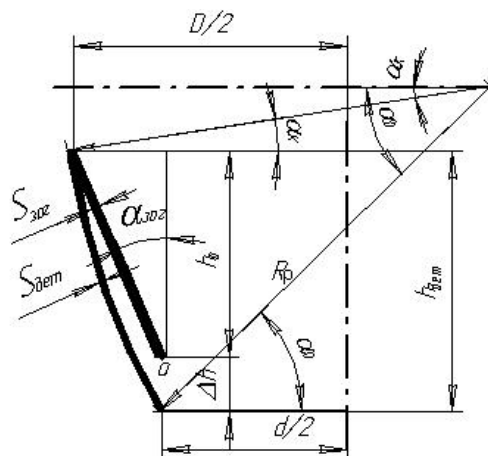


Рисунок 5.3 - Геометрическая схема для определения перемещения пуансона при формовке выпуклой детали:

D - диаметр большего основания детали; d - диаметр меньшего основания детали;
 $\alpha_{заг}$ - угол конусности заготовки

Для случая формовки вогнутой детали угол конусности исходной заготовки принимается (рис. 5.4):

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{заг}} = \frac{(R-r)}{h_{\text{дем}}}.$$

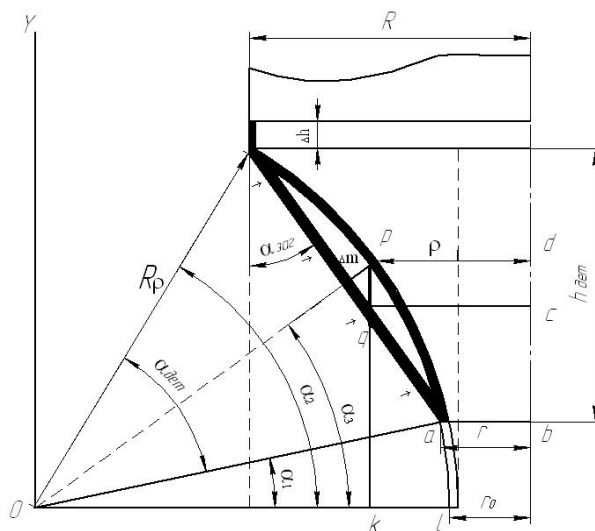


Рисунок 5.4 - Геометрическая схема для определения перемещения пуансона при формовке вогнутой детали:

R - радиус большего основания детали; r - радиус меньшего основания детали; $\alpha_{\text{заг}}$ - угол конусности заготовки; $\alpha_{\text{дем}}$ - угол, образованный кромкой детали меньшего и большего оснований; $h_{\text{дем}}$ - высота детали; Δm - наибольшее расстояние между заготовкой и элементами детали, расположенными на биссектрисе угла детали; pd - линия вертикального перемещения элементов заготовки по радиусу ρ ; ρ - радиус в точке пересечения построенной биссектрисы и образующей детали; kl - проекция образующей детали, ограниченной углами α_1 и α_2 ; α_1 - угол, образованный кромкой детали меньшего основания и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали; α_2 - угол, образованный кромкой детали большего основания и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали; α_3 - угол, образованный биссектрисой угла и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали

Из известных форм заготовки, детали и условия постоянства объемов определяется толщина заготовки:

$$\begin{aligned} V_{\text{заг}} &= V_{\text{дем}}, \\ F_{\text{нф}} S_{\text{дем}} &= F_{\text{заг}} S_{\text{заг}}, \\ S_{\text{заг}} &= \frac{F_{\text{нф}} S_{\text{дем}}}{F_{\text{заг}}}, \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$F_{нф} = F_{дет} + F_{ц.ч}, \quad (5.17)$$

где $F_{нф}$ - площадь поверхности детали с учетом цилиндрического припуска, необходимого для формовки в условиях плоскодеформированного состояния;

$F_{ц.ч}$ - площадь цилиндрического припуска.

Цилиндрический припуск необходим, чтобы соблюдалось условие плоскодеформированного состояния во избежание гофрообразования заготовки. Эти условия выполняются, если часть объема заготовки перейдет в цилиндрическую часть, являющуюся технологическим припуском. Это объясняется следующими факторами:

- площадь поверхности конической заготовки всегда больше вогнутой при одинаковой высоте и одинаковых диаметрах;

- утонить заготовку следует равномерно. Для этого необходимо, чтобы все элементы заготовки, в том числе и в средней части, как и элементы в зонах малого и большого диаметров деформировались в одинаковых условиях, т.е. близких к схеме плоскодеформированного состояния. Элемент из точки d должен переместиться по вертикали и занять положение в точке p (с радиусом ρ).

Из геометрических соотношений определим (см. рис. 5.4):

$$\begin{aligned} \rho &= kl + r = R_\rho (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_3) + r, \\ F_{дет} &= 2\pi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [r + R_\rho (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)] R_\rho d\alpha = \\ &= 2\pi R_\rho [\alpha_{дет} r + R_\rho \cos \alpha_1 \cdot \alpha_{дет} - R_\rho (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)] \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\alpha_{дет} = \alpha_2 - \alpha_1,$$

$$F_{ц.ч} = 2\pi R \cdot \Delta h. \quad (5.19)$$

Выразим из (5.16) с учетом (5.17), (5.19) величину Δh , которая определяет перемещение пуансона:

$$\Delta h = \frac{F_{заг} S_{заг} - F_{дет} S_{дет}}{2\pi R \cdot S_{дет}}. \quad (5.20)$$

Чтобы рассчитать данное значение, необходимо знать толщину заготовки. Ее определим следующим образом: для условия плоскодеформированного состояния необходимо, чтобы все элементы деформирующей средней части детали перемещались вдоль вертикальной линии pq . Найдем толщину части заготовки, ограниченной радиусом r и ρ , формирующую часть детали с теми же радиусами (образующая ap) из условия постоянства объемов:

$$F_{ap} S_{ap} = F_{заг\ ap} S_{заг\ ap}, \quad (5.21)$$

где F_{ap} - площадь части детали, ограниченной радиусами r и ρ (образующая ap);

S_{ap} - толщина части детали, ограниченной радиусами r и ρ ;

$F_{заг\ ap}$ - площадь части заготовки, участвующей в формообразовании детали, ограниченной радиусами r и ρ (образующая ad);

$S_{заг\ ap}$ - толщина части заготовки, участвующей в формообразовании детали, ограниченной радиусами r и ρ (образующая ad).

Считая, что толщины всей детали и всей заготовки одинаковы ($S_{ap} = S_{дет}$, $S_{заг\ ap} = S_{заг}$), проведем преобразования аналогичные выводу (5.16):

$$F_{ap} = 2\pi \int_{\alpha_1}^{\alpha_3} [r + R_\rho (\cos \alpha_3 - \cos \alpha_1)] R_\rho d\alpha = 2\pi R_\rho [\alpha_{ap} r + R_\rho \cos \alpha_1 \cdot \alpha_{ap} - R_\rho (\sin \alpha_3 - \sin \alpha_1)],$$

где $\alpha_{ap} = \alpha_3 - \alpha_1$,

$$F_{заг\ ap} = \frac{\pi(\rho^2 - r^2)}{\sin \alpha_{заг}}.$$

Из соотношения (5.21) имеем:

$$S_{заг\ ap} = S_{ap} \frac{F_{ap}}{F_{заг\ ap}}.$$

С учетом записи (5.21) и полученных последних отношений:

$$S_{заз} = S_{заз} = S_{дем} \frac{F_{ап}}{F_{заз}} = S_{дем} \frac{2\pi R_{\rho} [\alpha_{ап} r + R_{\rho} \cos \alpha_1 \cdot \alpha_{ап} - R_{\rho} (\sin \alpha_3 - \sin \alpha_1)] \sin \alpha_{заз}}{\pi [(R_{\rho} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_3) + r)^2 - r^2]}. \quad (5.22)$$

Тогда формула (5.20) приводится к виду

$$\Delta h = \frac{\frac{\pi(R^2 - r^2)}{\sin \alpha_{заз}} \cdot S_{дем} \frac{2\pi R_{\rho} [\alpha_{ап} r + R_{\rho} \cos \alpha_1 \cdot \alpha_{ап} - R_{\rho} (\sin \alpha_3 - \sin \alpha_1)] \sin \alpha_{заз}}{\pi [(R_{\rho} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_3) + r)^2 - r^2]}}{2\pi R \cdot S_{дем}} - \frac{2\pi R_{\rho} [\alpha_{дем} r + R_{\rho} \cos \alpha_1 \cdot \alpha_{дем} - R_{\rho} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)] S_{дем}}{2\pi R \cdot S_{дем}}. \quad (5.23)$$

5.2.2 Определение размеров развертки конической заготовки

По размерам срединной поверхности конической заготовки (см. рис. 5.2; 5.5) определяют размеры развертки ($\bar{R}_1; \bar{r}_1; \theta$) с учетом припуска для зажимов по торцам ($\Delta_1; \Delta_2$).

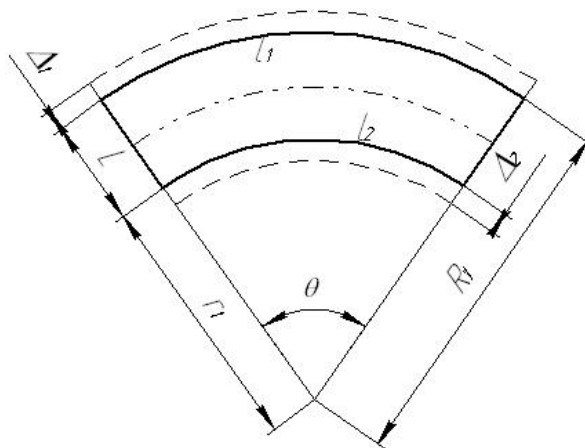


Рисунок 5.5 - Схема заготовки и развертки

Для построения развертки из условия равенства длин окружностей большего и меньшего диаметров образующей конической оболочки, длин дуг и высоты развертки имеем:

$$R_1 - r_1 = \frac{D - d}{2 \sin \alpha_{заз}}, \quad l_1 = \pi \cdot D = R_1 \cdot \theta, \quad l_2 = \pi \cdot d = r_1 \cdot \theta,$$

где l_1 и l_2 - длины дуг;

θ - угол развертки;

R_1 - расстояние от центра развертки до ее большего основания;

r_1 - расстояние от центра развертки до ее меньшего основания;

D - диаметр большего основания детали (с чертежа детали);

d - диаметр меньшего основания детали (с чертежа детали);

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

H - высота детали (с чертежа детали).

Решив систему трех уравнений относительно R_1, r_1, θ , получим:

$$\theta = 2\pi \sin \alpha_{заг}, \quad (5.24)$$

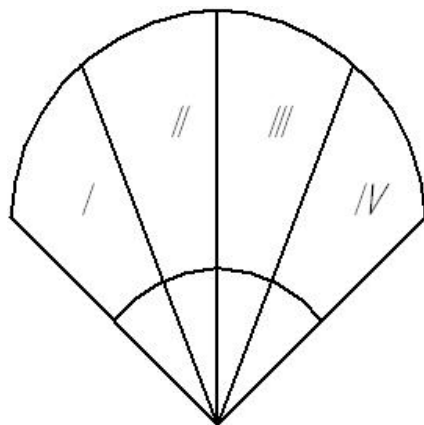
$$R_1 = \frac{l_1}{\theta}, \quad (5.25)$$

$$r_1 = \frac{l_2}{\theta}. \quad (5.26)$$

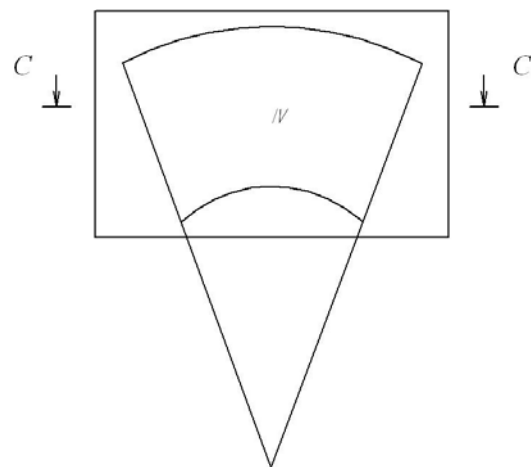
С учетом припуска для зажимов:

$$\bar{R}_1 = R_1 + \Delta_1; \quad \bar{r}_1 = r_1 - \Delta_2. \quad (5.27)$$

По размерам листа проводится раскрой. Вся развёртка, возможно, не уместится, поэтому на лист наносится либо её четверть, либо треть, либо половина (рис. 5.6).



А - полная развёртка



В - раскрой листа частью развёртки

Рисунок 5.6 - Схема раскроя листа

Полученные сегменты необходимо перед сваркой согнуть либо в валках, либо в штампе по схеме (рис. 5.7).

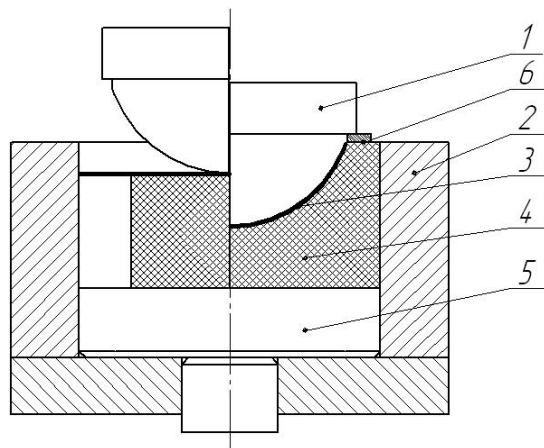


Рисунок 5.7 - Схема гибки в штампе по сечению СС (рис. 5.6 - В):

1 - пуансон; 2 - контейнер; 3 - деталь; 4 - эластичная среда; 5 - толкатель; 6 - прокладка

Давление эластичной среды допускается не более 2 МПа. Штамп можно использовать для разных размеров заготовки, заменив пуансон 1 и прокладку 6. Радиусы пуансона рассчитываются с учётом пружинения в каждом сечении:

$$\frac{1}{\rho_{\text{Ност}}} = \frac{1}{\rho} - \frac{Mu}{EI}, \quad (5.28)$$

где $\rho_{\text{Ност}}$, ρ - радиусы кривизны остаточный и заданный;

$$Mu = \frac{S^2}{4} \sigma_{\epsilon} - \text{момент изгиба};$$

S - толщина;

E - модуль упругости;

$$I = \frac{S^2}{12} - \text{момент инерции.}$$

После подготовки заготовок сварку проводят по технологии сварки для тонкостенных материалов из нержавеющей сталей с использованием приспособлений.

После сварки необходима зачистка швов.

На специальных машинах (если необходимо) производят отбортовку кромок по большому торцу, так, чтобы ширина фланца была не менее 50 мм (рис. 5.8). Угол определяется из условия:

$$\text{tg } \alpha_{\text{заг}} = \frac{D_{\text{заг}} - d_{\text{заг}}}{2H_{\text{заг}}}. \quad (5.29)$$

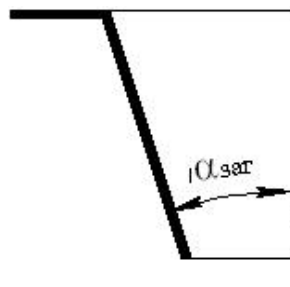


Рисунок 5.8 - Схема отбортовки

5.2.3 Определение давления, создаваемого эластичным элементом, эластичным буфером, и усилии процесса

Расчет этого технологического параметра проводится по формуле (3.26), что, в свою очередь, требует определения коэффициента пропорциональности сжатия эластичного элемента k по формуле (3.53) для вогнутой или выпуклой формы; по формуле (3.54) для конической формы. В уравнениях (3.53); (3.54) коэффициент трения выбирается из условия деформирования по данным [55] или по методике, предложенной в работе [41]. Коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела и показатели механических свойств выбираются для конкретного металла в соответствии с методикой испытания образцов на линейное растяжение. Для этого подготавливаются образцы из материала вдоль и поперек проката. Учитывая допущение, что материал является трансверсально-изотропным, коэффициент μ в плоскости листа определяется по известной методике [10,13,59]. Усилие, создаваемое эластичным элементом, определяется по формуле (3.64); давление от эластичного буфера - по формуле (3.72); усилие эластичного буфера - по формуле (3.66); величина сжатия буфера - по формуле (3.85). Для определения величины создаваемого давления от эластичного буфера используем формулы по аналогии с главой 3.2.1.5. Учтем, что объем смещенной части эластичного элемента при формообразовании вогнутой детали вычисляется (см. рис. 3.3):

$$V_1 = V_{кон} - V_{дет} - V_{цил} + V_{цил.верх},$$

где $V_{цил.верх}$ - объем, сформированный цилиндрическим участком верхней части пуансона, участвующей в формообразовании, равный:

$$V_{\text{цил.верх}} = \pi R^2 \Delta h.$$

При $\rho = r + R_\rho (\cos \alpha_1 - \cos \alpha)$ (см. рис. 5.4) имеем:

$$\begin{aligned} V_{\text{дем}} = & \pi R_\rho r^2 (\alpha_2 - \alpha_1) + 2\pi R_\rho^2 r \cos \alpha_1 (\alpha_2 - \alpha_1) - 2\pi R_\rho^2 r (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) + \\ & + \pi R_\rho^3 \cos^2 \alpha_1 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) - 2\pi R_\rho^3 \cos^2 \alpha_1 (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) + 0,5\pi R_\rho^3 (\alpha_2 - \alpha_1) + \\ & + \frac{\pi R_\rho^3}{4} (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) \end{aligned}$$

5.3 Проектирование из конусной сварной заготовки с использованием процесса отбортовки (обтяжки)

Последовательность проектирования относится к способам, схемы которых представлены на рисунках (см. рис. 4.4; рис. 4.5; рис. 4.6).

- Размеры заготовки рассчитываются по формулам раздела 5.2, что позволяет получить деталь с минимальной разнотолщинностью.
- Обеспечивается условие, при котором деталь не соскальзывает с пуансона (формула 4.32). Если предлагаемое соотношение не выполняется, следует применить схему, представленную на рис. 4.9, с зажимом заготовки по большому торцу.
- Рассчитывается усилие процесса:

$$P = q \cdot F_{np}, \quad (5.30)$$

где q - давление эластичной среды;

F_{np} - площадь проекции детали на горизонтальную поверхность.

При

$$q = (1 \div 3) \text{МПа} \quad (5.31)$$

условие сжатия не более 30%.

5.4 Проектирование из цилиндрической заготовки

Последовательность проектирования относится к способу, схема которого представлена на рисунке (см. рис. 4.7).

- Определяется величина относительного радиуса $\bar{R}_{дет}$ при величине утонения по формулам (4.50); (4.51); (4.52).
- Рассчитывается наименьшая толщина детали по формуле (4.50) для выпуклой детали и по формуле (4.56) - для вогнутой детали.
- Определяется усилие процесса по формулам (5.30); (5.31).

5.5 Проектирование деталей бочкообразной формы

Последовательность проектирования относится к способу, схема которого представлена на рисунке (см. рис. 4.8).

- Размеры заготовки принимаются из условия:

- диаметр равен наименьшему диаметру детали;

- высота равна:

$$H_{заг} = H_{дет} + 2\Delta H_{дет}, \quad (5.32)$$

где $H_{дет}$ - высота детали;

$\Delta H_{дет}$ - допуск по высоте.

- Определяется усилие процесса по формулам (5.30); (5.31).
- Рассчитывается относительная толщина детали по формуле (4.76).

5.6 Проектирование элементов оснастки

- Расчет контейнера на прочность:

Так как контейнер находится под внутренним давлением, то с целью безопасности эксперимента необходимо рассчитать его на прочность. Используя выводы расчета на прочность толстостенных цилиндров, нагруженных изнутри равномерным давлением [48], определили напряжения в тангенциальном направлении. Внутреннее давление, созданное эластичным элементом, рассчитывается по формуле (3.26):

$$\sigma_{\theta} = \frac{qr_{конт}^2}{R_{конт}^2 - r_{конт}^2} + \frac{qr_{конт}^2 R_{конт}^2}{R_{конт}^2 - r_{конт}^2} \cdot \frac{1}{r_{конт}^2} \leq \left[\sigma_{\theta}^- \right], \quad (5.33)$$

где $R_{\text{конт}}$, $r_{\text{конт}}$ - радиусы контейнера наружный и внутренний соответственно;

$\left[\bar{\sigma}_\theta \right]$ - предельное значение напряжения в тангенциальном направлении.

- Для создания активных сил трения на поверхности заготовки и эластичного элемента диаметр контейнера определяется по формуле (3.86).

Для процессов формообразования эластичным элементом конической формы (рис. 5.9) будем считать, что схема сжатия эластичного конического элемента в виде толстостенной оболочки эквивалентна сжатию эластичного элемента в виде кольца (рис. 5.10).

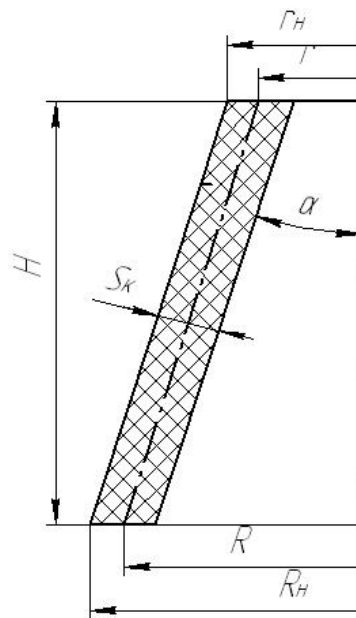


Рисунок 5.9 - Эластичная коническая оболочка:

H - высота эластичного конического элемента; R, R_n - больший радиус по срединной и наружной поверхности эластичного конического элемента; r, r_n - меньший радиус по срединной и наружной поверхности эластичного конического элемента; S_k - толщина эластичного конического элемента

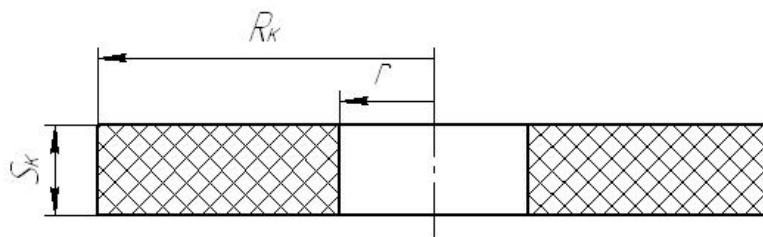


Рисунок 5.10 - Эластичный элемент в виде кольца:

R_k - больший радиус кольца; r - радиус отверстия в кольце; S_k - толщина кольца

При этом примем, что толщина толстостенной конической оболочки равна толщине эластичного элемента в виде кольца, внутренний радиус кольца равен наименьшему радиусу конического эластичного элемента, а наружный радиус равен:

$$R_k = \sqrt{r^2 + \frac{(R-r)^2}{\sin \alpha}}, \quad (5.34)$$

где $r \approx r_n - S_k$, т.к. $r_n \geq S_k$.

Выражение получено из условия равенства площадей по срединной поверхности конической эластичной оболочки и эластичного кольца.

Рассмотренная модель позволяет рассчитать размеры эластичного конического элемента в виде толстостенной оболочки. Если его размеры R_k , r_n , H определены геометрией заготовки, которая рассчитывается из теоретического анализа, то толщина может быть рассчитана в следующей последовательности:

- Определяется необходимое давление эластичного элемента в той части заготовки, которая деформируется в последнюю очередь, т.е. той части, которая соприкасается с матрицей на заключительной стадии. Для этого используем уравнение Лапласа [60]:

$$q_l = S_{заг} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right), \quad (5.35)$$

где q_l - давление, создаваемое эластичным элементом;

R_ρ - радиус рассматриваемого элемента в меридиональном направлении;

R_θ - радиус рассматриваемого элемента в тангенциальном направлении;

σ_ρ - напряжения элемента заготовки на заключительной стадии в меридиональном направлении;

σ_θ - напряжения элемента заготовки на заключительной стадии в тангенциальном направлении;

$S_{заг}$ - толщина заготовки.

Необходимо выполнить условие $q_{л} \leq q$ (см. формулу 5.31). Если считать, что $R_{\rho} = \infty$, $\sigma_{\rho} \rightarrow 0$, то выражение (5.35) примет вид

$$q = S_{заг} \frac{\sigma_{\theta}}{R_{\theta}}. \quad (5.36)$$

- Расчет толщины конической эластичной оболочки определяется исходя из необходимого давления. Для этого используются диаграммы сжатия эластичного элемента (резины), которые достаточно широко представлены (рис. 5.11). Условием выбора относительных размеров эластичного элемента в виде кольца служит максимальная величина сжатия по толщине, не превышающая 10-15% , и напряжение сжатия, определяемого по формуле (5.36), при $\sigma_{\theta} = \sigma_{0,2}$.

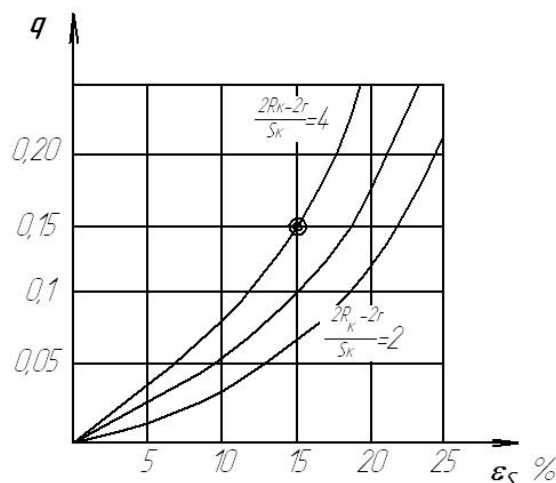


Рисунок 5.11 - Диаграмма сжатия резины

- Необходимо выполнить условие, чтобы величина сжатия резины не превышала в местах наибольшего деформирования более 30%.
- Определение числа и размеров подвижных секторов. Схема для расчета представлена на (рис. 5.13).

Подвижные сектора 1 получены путем распила конической оболочки, прилегающей к конусу 2, вдоль образующих на несколько частей. Поэтому при движении вдоль конуса отсечений меньшего диаметра к большему образуется зазор ϖ между внутренней поверхностью подвижного сектора 1 и поверхностью конуса 2.

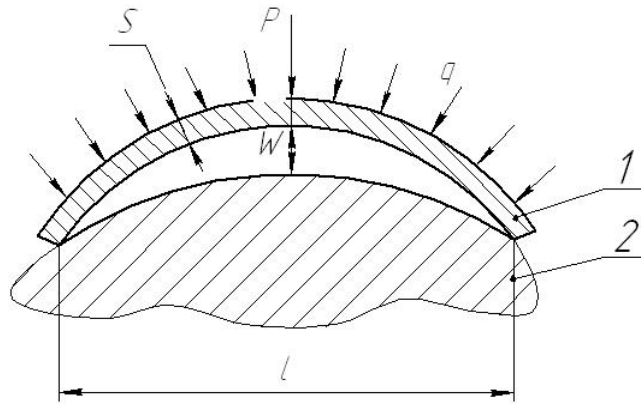


Рисунок 5.12 - Схема действия сил на подвижный сектор:

P - результирующее усилие; q - давление эластичной среды; 1- подвижный сектор; 2- конус

Подвижный сектор должен передавать усилия от прессы при минимальной толщине, не деформируясь и не разрушаясь. Поэтому размеры сектора l , S должны быть согласованные с давлением среды q . Необходимым условием согласования этих параметров может быть равенство момента внутренних и внешних сил:

$$M_u = M_e, \quad (5.37)$$

где M_u , M_e - моменты внешних и внутренних сил.

Будем считать:

$$M_u = P \cdot l = \frac{q \cdot l^2}{2}, \quad (5.38)$$

$$M_e = \sigma_{0,2} \frac{S^2}{4}. \quad (5.39)$$

Из условий (5.38); (5.39) имеем:

$$S = \sqrt{\frac{2q \cdot l^2}{\sigma_{0,2}}}, \quad (5.40)$$

где l - ширина подвижного сектора в сечении наибольшего радиуса R_c .

Его длина определяется:

$$l = \frac{2\pi R_c}{N}, \quad (5.41)$$

где N - число секторов.

Из равенств (5.40) и (5.41) можно определить:

$$N = \sqrt{\frac{8 \cdot q \pi^2 R_c^2}{\sigma_{0,2} S^2}}. \quad (5.42)$$

- Рассчитывается усилие процессов формообразования эластичным буфером сложных деталей с подвижными секторами.

Схема к определению усилия представлена на рис. 5.13.

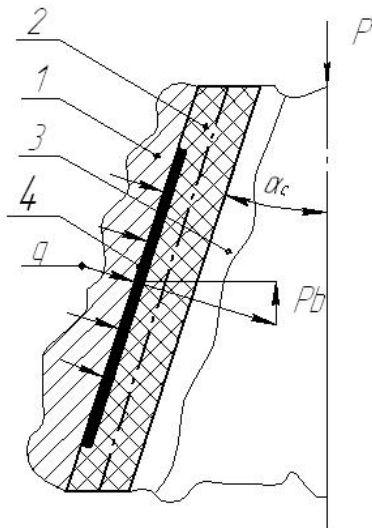


Рисунок 5.13 - Схема действия сил на подвижный сектор:

1-матрица; 2- эластичный элемент; 3- подвижный сектор; 4 – заготовка; q - давление эластичной среды; P_g - внутреннее усилие сопротивления; P - внешнее усилие; α_c - угол конусности

Запишем условие равенства внешнего и внутреннего усилий:

$$P_g = P, \quad (5.43)$$

где P_g - результирующее внутреннее усилие.

$$P_g = K_3 q F \cdot \sin \alpha_c, \quad (5.44)$$

где F - площадь константа эластичного элемента 2 с матрицей 3;

K_3 - коэффициент запаса, равный 1,2 ÷ 1,3.

Для деталей более сложной формы (бочкообразные, с цилиндрическими участками) запишем:

$$P_g = kq \sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_c, \quad (5.45)$$

где F_i - площади контакта рассматриваемой части эластичного элемента и матрицы.

В формуле (5.45) давление q принято равномерным по всему объему эластичной среды.

Список использованных источников

1. А.с. 1563813 СССР, МКИ5В21D41/02. Способ раздачи оболочки [Текст]/А.Н. Шипилов, С.А. Шульга (СССР). – № 4405224/31-27; заявл. 06.04.88; опубл. 15.05.90, Бюл. № 18.
2. А.с. 1748905 СССР, МКИ5В21D22/30. 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.
3. Аверкиев, А.Ю. Деформации и напряжения при раздаче полых оболочек секционным и разжимными пуансонами [Текст]/А.Ю. Аверкиев//Вестник машиностроения. – 1996. – №2. – С. 33-37.
4. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла [Текст]/А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
5. Аверкиев, Ю.А. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением [Текст]/ Ю.А. Аверкиев. – М. – Л.: Машгиз, 1957. – 215 с.
6. Аверкиев, Ю.А. Холодная штамповка [Текст]/Ю.А. Аверкиев. – Изд-во Ростовского университета, 1984. – 288 с.
7. Машиностроение. Энциклопедия. Технологии заготовительных производств [Текст] Т. III-2 / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и [др.]; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. – М.: Машиностроение, 1996. – 736 с.
8. Алюшин, Ю.А. Формоизменение полых оболочек секционным разжимным инструментом [Текст]/Ю.А. Алюшин, А.Н. Шипилов//Машиноведение. – 1987. – №1. – С. 98-104.
9. Арышенский, Ю.М. Получение рациональной анизотропии в листах [Текст]/Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников, В.Ю. Арышенский. – М.: Metallургия, 1987. – 141 с.
10. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов [Текст]/Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Metallургия, 1990. – 304 с.
11. Арышенский, Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов [Текст]/Ю.М. Арышенский. – М.: Изд-во Саратовского университета, 1973. – 112 с.
12. 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.
13. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов [Текст]/Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
14. Григорьев, Л.Л. Холодная штамповка [Текст]: справочник /Л.Л. Григорьев, К.М. Иванов, Э.Е. Юргенсон – СПб.: Политехника, 2009. – 665 с.

15. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением [Текст]/Н.П. Громов. – М.: Металлургия, 1967. – 340 с.
16. 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.
17. 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.
18. Демьяненко, Е.Г. Исследование процесса формообразования цельноштампованных деталей по схеме отбортовка-формовка [Текст]/Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов, А.Г. Шляпугин//Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 138-145.
19. Демьяненко, Е.Г. Направленное изменение толщины конической оболочки [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. докл. Междунар. молод. науч. конф. XV Туполевские чтения. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т. – 2007. – Т. 1. – С. 52- 54.
20. Демьяненко, Е.Г. Основные допущения процесса формовки для получения тонкостенных деталей с постоянной толщиной стенки [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. докл. XII Междунар. науч. конф. Решетневские чтения. – Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2008. – С. 199-201.
21. Демьяненко, Е.Г. Устройство для формовки вогнутых оболочек [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. докл. Междунар. молод. науч. конф. XVI Туполевские чтения. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2008. – Т. 1. – С. 61-63.
22. 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.
23. Дмитриев, А.М. Аппроксимация кривых упрочнения металлов [Текст]/А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов//КШП ОМД. – 2004. – №1. – С. 23-26.
24. Дмитриев, А.М. Технологияковки объемной штамповки [Текст] Ч. 1. Объемная штамповка выдавливанием /А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов. – М.: Высш. шк., 2002. – 400 с.
25. К методике кривых упрочнения [Текст]/Ю.В. Зильберг, В.Г. Братутин, З.В. Каневский // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 6. – С. 8-11.
26. Определение оптимальных условий штамповки осесимметричных оболочек оптимальной формы [Текст]/А.А. Имшенецкий, В.П. Сабелькин, В.А. Кривцов [и др.]; Харьк. авиац. ин-т. – Харьков, 1990. – 7с. – Деп. в ВНИИТЭМР 26.07.90, № 153-мш90.

27. Исаченков, Е.И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением [Текст]/Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
28. Исаченков, Е.И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст]/Е.И. Исаченков – М.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
29. 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.
30. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст]/Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512с.
31. Каргин, В.Р. Основы инженерного эксперимента [Текст]: учеб. пособие/В.Р. Каргин, В.М. Зайцев. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. – 86 с.
32. Кассандрова, О.Н. Обработка результатов наблюдений [Текст]/О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 88 с.
33. Контактное трение в процессах ОМД [Текст]/А.Н. Леванов, В.Л. Колмагоров, С.Л. Буркин [и др.] – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
34. Лысов, М.И. Пластическое формообразование тонкостенных деталей авиатехники [Текст]/ М.И. Лысов, И.М. Закиров. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
35. Лысов, М.И. Формообразование деталей гибкой [Текст]/ М.И. Лысов, Н.В. Соснов. – М.: Машиностроение, 2001. – 388 с.
36. Малов, А.Н. Технология холодной штамповки [Текст]/А.Н. Малов. – М.: Машиностроение, 1969. – 568 с.
37. 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.
38. Мельников, Э.Л. Холодная штамповка днищ жидкостью [Текст]/Э.Л. Мельников. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
39. Михеев, В.А. Метод получения обводообразующих оболочек с минимальной разнотолщиной способами обтяжки [Текст]/В.А. Михеев, Д.В. Щуровский //Обработка металлов. – 2006. – №3(20). – С. 24 – 26.
40. Мошнин, Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей [Текст]/Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1973. – 240 с.
41. 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.
42. Пат. 102543 Российская Федерация, МПК7B21D20/30. Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей выпуклой формы [Текст]/Попов

- И.П., Демьяненко Е.Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – № 2010140398; заявл. 02.04.2008; опубл. 10.03.2011, Бюл. №7.
43. Пат. 115256 Российская Федерация, МПК7B21D22/10. Устройство для формообразования кольцевой тонкостенной заготовки [Текст]/Попов И.П., Демьяненко Е.Г., Сулейманова И.Р.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – № 2011144942/02; заявл. 07.11.2011; опубл. 27.04.2012, Бюл. №12.
44. Пат. 128527 Российская Федерация, МПК7B21D22/10. Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы [Текст]/Попов И.П., Демьяненко Е.Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – № 2012147877/02; заявл. 09.11.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. №5.
45. Пат. 1334474 Российская Федерация, МПК6B21D41/02. 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.
46. Пат. 58055 Российская Федерация, МПК7B21D22/30. 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.
47. Пат. 78709 Российская Федерация, МПК7B21D20/30. 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. – №2008112698; заявл. 02.04.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.
48. Расчеты на прочность в машиностроении. [Текст] Т. 2. Некоторые задачи прикладной теории упругости. Расчеты за пределами упругости. Расчеты на ползучесть /С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев [и др.]. – М.: Государственное научнотехническое издательство машиностроительной литературы, 1958. – 974 с.
49. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки [Текст]/Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
50. 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.
51. 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.
52. 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. – 74с.

53. 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.
54. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст]/В.П. Романовский – Л.: Машиностроение, 1965. – 226 с.
55. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст]/В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
56. Рудман, Л.И. Справочник конструктора штампов. Листовая штамповка [Текст]/Л.И. Рудман. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.
57. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст]/М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
58. Томленов, А.Д. Влияние анизотропии листового металла на процессы пластического формоизменения [Текст]/А.Д. Томленов//Кузнечно-штамповочное производство. – 1962. – № 4. – С. 1-2.
59. Томленов, А.Д. Пластическое течение металлов [Текст]/А.Д. Томленов. – М.: Наука, 1968. – 148 с.
60. Теорияковки 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.
61. Чертавских, А.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением [Текст]/А.К. Чертавских, В.К. Белосевич. – М.: Металлургия, 1968. – 364 с.

Учебное издание

*Демьяненко Елена Геннадьевна,
Попов Игорь Петрович*

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

Учебное пособие

Редактор Т.К. Кретинина
Доверстка Т.Е. Половнева

Подписано в печать 23.06.2014. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 9,0.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. 16/2014.

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

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