

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)

Технологии авиационно-космического назначения с использованием новых листовых материалов

Электронный учебно-методический комплекс дисциплины

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка магистерской программы и образовательных контентов «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением с воздействием электромагнитных источников» Соглашение № 1/11 от 03 июня 2013 г.

САМАРА 2013

УДК 662.2.8
Т 384

Автор-составитель: Демьяненко Елена Геннадьевна

Технологии авиационно-космического назначения с использованием новых листовых материалов [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Е. Г. Демьяненко. -Электрон. текстовые и граф. дан. - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В состав учебно-методического комплекса входят:

1. Курс лекций.
2. Методические указания к лабораторным работам.
3. Методические указания к практическим занятиям.
4. Заявка на патент.

УМКД «Технологии авиационно-космического назначения с использованием новых листовых материалов» предназначен для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по направлению подготовки магистров 150400.68 «Металлургия» в В семестре.

УМКД разработан на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

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
ТЕХНОЛОГИИ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электронный конспект лекций

Самара 2013

УДК 662.2.8
Д 321

Автор: Демьяненко Елена Геннадьевна

Демьяненко, Е.Г. Технологии авиационно-космического назначения с использованием новых листовых материалов [Электронный ресурс]: электрон. конспект лекций / Е.Г. Демьяненко; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) - Электрон. текстовые и граф. дан. (13,6 Мбайт). - Самара, 2013.

Приведены сведения о прогрессивных способах пластического деформирования тонкостенных осесимметричных заготовок, в условиях всестороннего растяжения для деталей усеченной сужающейся формы. Предложены устройства, являющиеся простыми по конструктивному исполнению, но обладающие высокой надежностью и позволяющие интенсифицировать процессы формообразования. Полученные результаты работы могут использоваться в производстве, сокращая время, операции и расход материалов при проектировании технологических процессов.

Предназначено для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением и воздействия электромагнитных источников» по направлению подготовки 150400.68 «Металлургия», изучающих дисциплину «Технологии авиационно-космического назначения с использованием новых листовых материалов» в V семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Основные условные обозначения	4
Введение	5
1 Анализ существующих способов изготовления тонкостенных осесимметричных деталей.....	7
2 Теоретический анализ процесса формообразования	53
2.1 Анализ напряженно-деформированного состояния.....	54
2.1.1 Исследование способа формообразования деталей из конической заготовки	56
2.1.2 Исследование способа формообразования деталей из кольцевой заготовки	73
2.1.3 Исследование способа формообразования деталей из цилиндрической заготовки	79
2.1.4 Исследование способа формообразования деталей бочкообразной формы.....	87
2.1.5 Исследование способа формообразования деталей на основе процесса отбортовки	93
Список использованных источников	101

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_σ - 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

В современных условиях конкурентоспособность изделий определяется сочетанием минимальной себестоимости и высокого качества. В производстве двигателестроения и деталей летательных аппаратов в первую очередь это относится к оболочкам и обшивкам, значительная часть которых представлена тонкостенными осесимметричными деталями усечённой сужающейся формы. Предварительно был проведен анализ использования подобных деталей и их классификация (см. рисунок 1.1). 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 [51]. 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 $\frac{S_{\text{ср}}}{D} \leq 0,008$ [91] (рассматриваемая относительная высота n : $0,5 \leq \frac{H}{D} \leq 0,7$ и отношение диаметров: $\frac{D}{d} = 1,1 \div 2,2$). При этом используемые заготовки бывают двух видов: цельные в виде колец (для невысоких деталей), сварные конические и конусы: с одним, двумя швами (для высоких деталей с $0,5 \leq \frac{H}{D}$), что расширяет диапазон деталей, имеющих выпукло-вогнутые поверхности. Развитие аэрокосмической техники приводит к необходимости производства востребованных деталей из цельной (несварной) заготовки. Возможность их изготовления в первую очередь связана с использованием способа отбортовки из кольцевой заготовки, характерными особенностями которого являются разнотолщинность

получаемой детали, наличие ограничения ее относительной высоты и предельные возможности, зависящие от пластических свойств материала в условиях плоского растяжения [37]. Интенсификация процесса изготовления таких деталей [46,47] затруднена ввиду потери устойчивости даже из-за малых сжимающих напряжений [89] и больших габаритов детали.

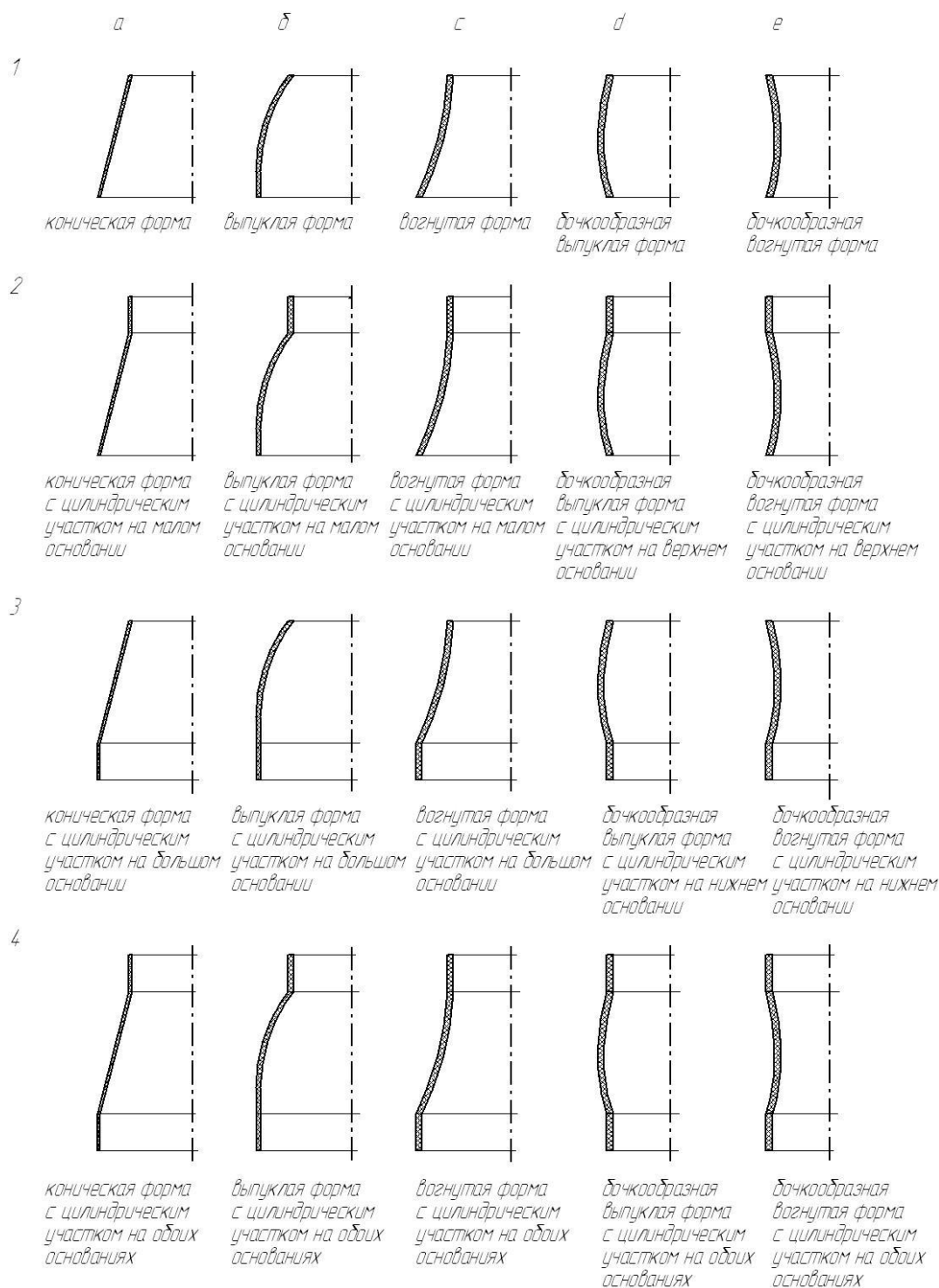
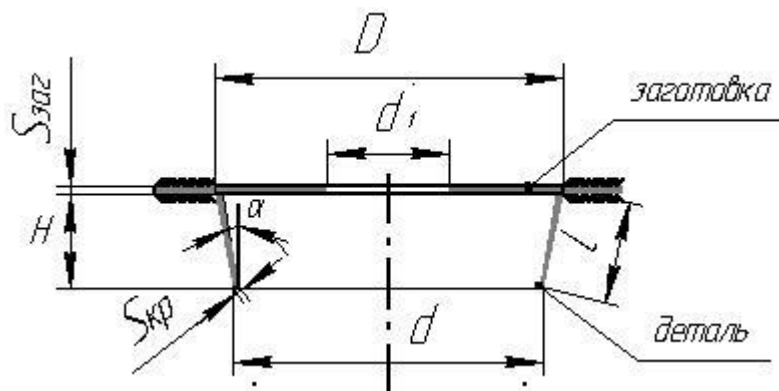


Рисунок 1.1 - Типовые контуры деталей

1 Анализ существующих способов изготовления тонкостенных осесимметричных деталей

Рассмотрим известные способы отбортовки из кольцевой, сварной заготовок коническим пуансоном (см. рисунок 1.2), с полученными зависимостями, позволяющими определить относительную глубину формованной детали.



D - больший диаметр детали; d - меньший диаметр детали; d_1 - диаметр отверстия в заготовке; α - угол конусности детали; H - высота детали; $S_{\text{заг}}$, $S_{\text{дет}}$ - толщина заготовки, толщина детали; l - длина образующей

Рисунок 1.2 - Схема процесса отбортовки из кольцевой заготовки

Определим распределение толщины вдоль образующей детали. Используем метод последовательного приближения, суть которого состоит в нахождении закона изменения толщины между двумя приближенными функциями. Процесс поиска функции продолжается до тех пор, пока между двумя решениями, определяющими характер изменения толщины, приближение не достигнет заданной точности. Желательно, чтобы, начиная с первого приближения, принятый закон изменения толщин был наиболее близок к реальному. При этом обязательным является условие, при котором выбранная функция первого приближения удовлетворяет граничным условиям. Тогда толщина элементов детали, расположенных в зоне наибольшего диаметра, равна толщине заготовки, а толщина элементов на кромке меньшего диаметра определяется из условия линейного растяжения [97]:

$$S_{кр} = S_{заг} \sqrt{\frac{1}{k_{отб}}}, \quad (1.1)$$

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

В качестве первого приближения можно взять функцию распределения толщины:

$$S_1 = a + b\rho, \quad (1.2)$$

где a и b - const.

Используя условие колокации [53], определим коэффициенты a и b , считая:

$$S = S_{кр} = S_{заг} \sqrt{\frac{1}{k_{отб}}} \text{ при } \rho = r_{кр}; S = S_{заг} \text{ при } \rho = R:$$

$$a = S_{заг} + \left(\frac{S_{заг} \sqrt{\frac{1}{k_{отб}}} - S_{заг}}{R - r_{кр}} \right) R, \quad b = - \frac{S_{заг} \sqrt{\frac{1}{k_{отб}}} - S_{заг}}{R - r_{кр}}. \quad (1.3)$$

Значения толщины $s_{дет}$ во втором приближении найдем из уравнения связи напряжений и деформаций [97]:

$$S_{дет} = S_2 = S_{заг} \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} + 1}{2 - \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}}}. \quad (1.4)$$

Соотношение напряжений $\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}$, как показали исследования [97,64], можно использовать без учета упрочнения. Связь между координатами r и ρ найдем из условия постоянства объема. Для части детали, ограниченной координатами R и ρ , имеем объем материала:

$$V'_{дет} = \frac{\pi(R^2 - \rho^2)}{\sin \alpha} S'_{cp}, \quad (1.5)$$

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

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

$$V'_{дет} = \pi(R^2 - r^2) S_{заг}. \quad (1.6)$$

Приравняв (1.5) и (1.6), находим:

$$r = \sqrt{-\frac{S_{заз} + a + b\rho}{2 S_{заз}} \cdot \frac{R^2 - \rho^2}{\sin \alpha} + R^2}. \quad (1.7)$$

Для определения напряжений без учета упрочнения запишем уравнение равновесия с учетом изменения толщины [97]:

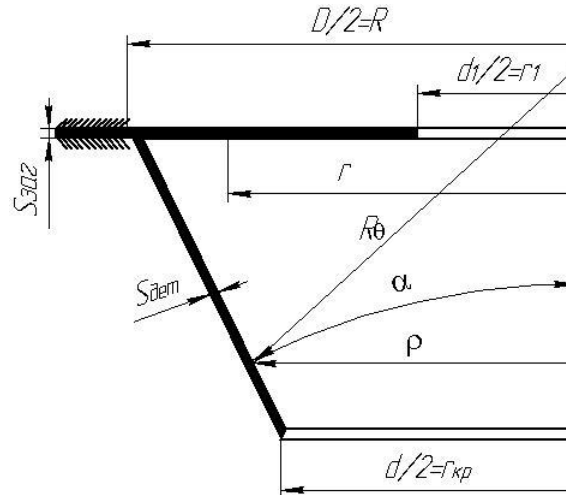


Рисунок 1.3 - Схема для определения соотношения координат элементов заготовки и детали

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left(1 + \frac{\rho dS_\perp}{S_{дет} d\rho} \right) - \sigma_\theta - \frac{f\rho}{\sin \alpha} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (1.8)$$

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

С учетом принятых допущений и условия пластичности [97]:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s, \quad (1.9)$$

решение уравнения (1.8) приводится к виду:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s \left\{ \frac{a}{(a + b\rho)(1 - fctg \alpha)} + \frac{b\rho}{(2 - fctg \alpha)(a + b\rho)} - \left(\frac{r_{кр}}{\rho} \right)^{1 - fctg \alpha} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{a + b r_{кр}}{(a + b\rho)} \right) \left(\frac{a}{(1 - fctg \alpha)(a + b r_{кр})} + \frac{b r_{кр}}{(2 - fctg \alpha)(a + b r_{кр})} \right) \right\} \quad (1.10)$$

Сравним полученные значения толщин в 1^{OM} (формула 2) и 2^{OM} (формула 4) приближениях, построив графики для разных коэффициентов трения (от 0,1 до 0,25), что позволит оценить характер изменения искомого параметра. Исходными данными являются параметры момента образования трещины: $k_{отб}$; D ; α , $S_{заг} / S_{кр}$. Угол конусности детали найдем из условия постоянства объема металла заготовки и детали:

$$V_{дет} = V_{заг}, \\ F_{дет} S_{cp} = F_{заг} S_{заг}, \quad (1.11)$$

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

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

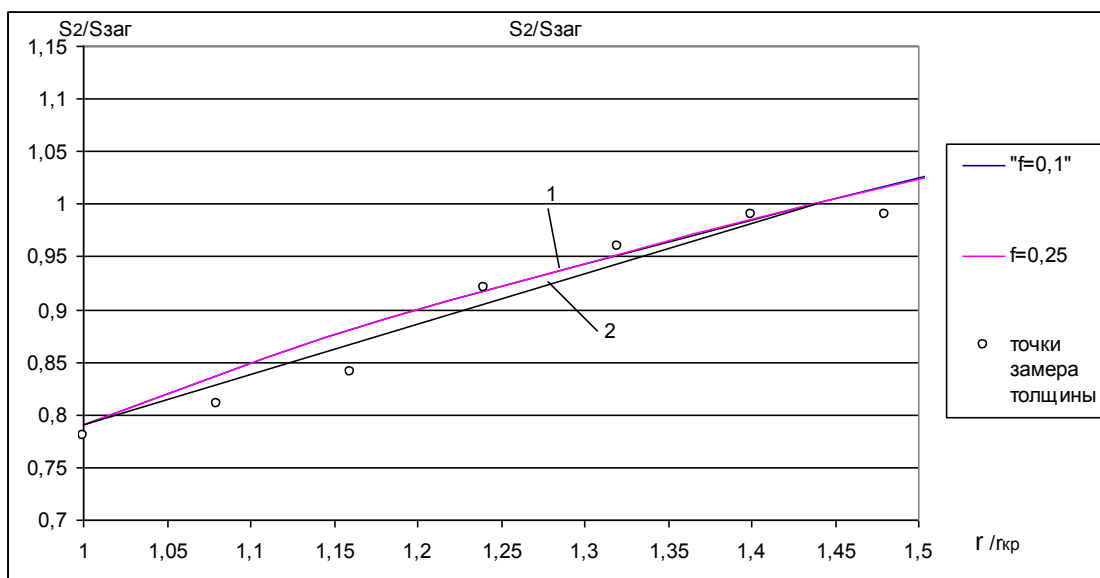
S_{cp} - средняя толщина детали, равная: $S_{cp} = \frac{S_{заг} + S_{кр}}{2}$.

Используем, кроме этого, геометрические соотношения (см. рисунок 1.2):

$$F_{дет} = \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot l, \quad l = \frac{D - d}{2 \sin \alpha}, \quad F_{заг} = \frac{\pi(D^2 - d_1^2)}{4}. \quad (1.12)$$

Тогда

$$\sin \alpha = \frac{\left[\left(\frac{D}{d_1} \right)^2 - \left(\frac{S_{заг}}{S_{кр}} \right)^4 \right] \left(1 + \frac{S_{кр}}{S_{заг}} \right)}{2 \left[\left(\frac{D}{d_1} \right)^2 - 1 \right]}. \quad (1.13)$$



1 - кривая в $1^{-\text{ом}}$ приближении; 2 - кривая во $2^{-\text{ом}}$ приближении

Рисунок 1.4 - График зависимости S_2 / S_{3ar} от ρ / r

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

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

Вывод подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными на материале АД0, толщиной 1,8 мм. Использовалась штамповая оснастка (см. рисунок 1.5).



1 - пуансон; 2 - прижим; 3 - матрица; 4 - подштамповая плита

Рисунок 1.5 - Универсальная гидравлическая машина ЦДМПУ-30

Заготовка имела наружный диаметр 180 мм, внутренний диаметр 50 мм. Отбортовка производилась коническим пуансоном до момента начала образования трещины, а именно до диаметра равного 80 мм (см. рисунок 1.6).



1 - исходная заготовка; 2 - деталь
Рисунок 1.6 - Заготовка и полученная деталь

Замер толщин проводился вдоль образующей в семи сечениях с шагом 4 мм (см. рисунок 1.7).

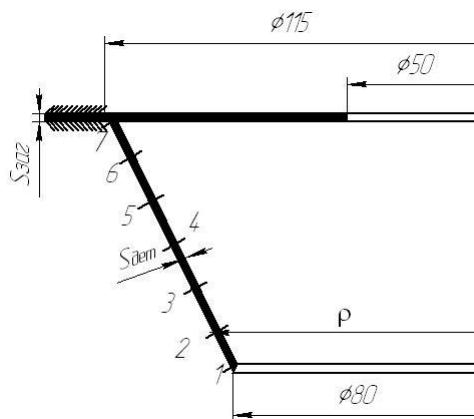


Рисунок 1.7 - Схема замера толщин вдоль образующей

Полученные данные по замеру толщин представлены на графике (см. рисунок 1.4) в виде нанесенных точек. Обработка результатов эксперимента проводилась методом математической статистики с доверительным интервалом 0,01 мм, при $t = 2,13$, $\alpha = 90\%$.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных (максимальная погрешность между теоретическими и экспериментальными данными не

превышает 10%) подтверждает полученный вывод. Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния, позволяет выявить: при каких условиях в процессе отбортовки конических деталей мы можем получать наибольшую относительную высоту. Применив условие постоянства объема (1.11), выражения (1.12) при $l = \frac{H}{\cos \alpha}$, определим относительную высоту:

$$\frac{H}{D} = \frac{\left[\left(\frac{D}{d_1} \right)^2 - 1 \right] \cos \{ \arcsin \alpha \}}{\left[\frac{D}{d_1} + \left(\frac{S_{заг}}{S_{кр}} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{S_{кр}}{S_{заг}} \right] \frac{D}{d_1}}. \quad (1.14)$$

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

$$\psi = e_{кр} = \frac{-F_0 + F}{F_0} = \frac{-\pi d_1 S_{заг} + \pi d S_{кр}}{\pi d_1 S_{заг}}. \quad (1.15)$$

Учитывая соотношения (1.1) и (1.15), имеем:

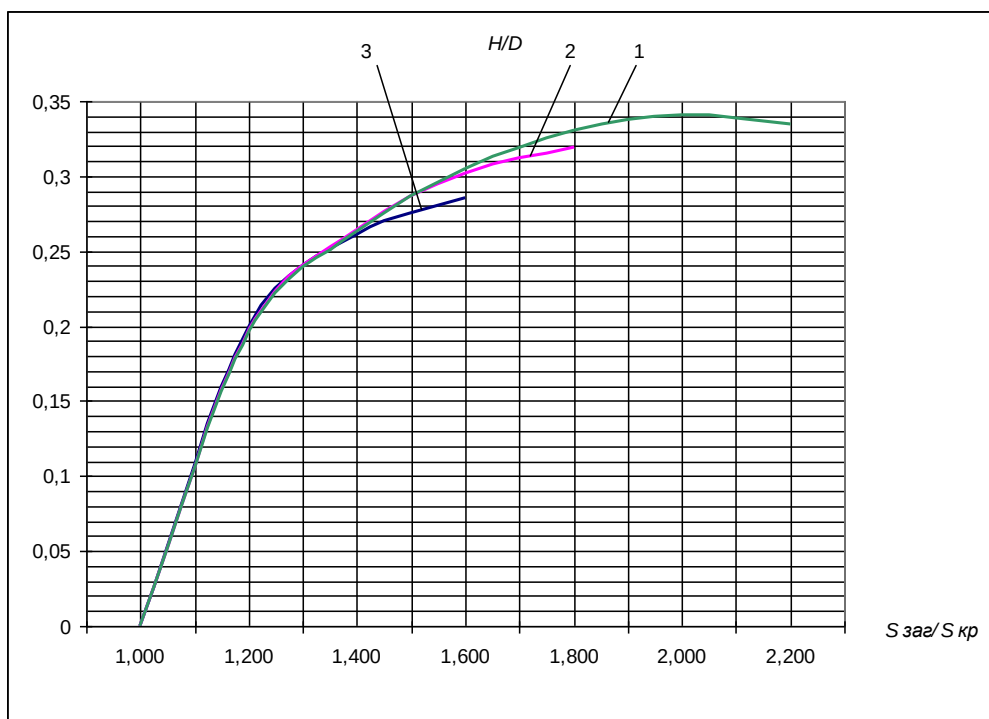
$$\psi = \sqrt{\frac{d}{d_1}} - 1 = \sqrt{k_{омб}} - 1. \quad (1.16)$$

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

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

На рисунке 1.8 представлена графическая зависимость H/D от $S_{заг} / S_{кр}$ для конкретного материала МЗ при формообразовании за несколько операций, с учетом механических свойств: $\delta_{ли} = 0,325$, $\psi_{ли} = 0,245$, $k_{пред} = 1,55$. Построенные графики позволяют оценить возможность формообразования 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 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.



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)

Рисунок 1.8 - График зависимости $S_{заг} / S_{кр}$ от H/D

Предложенным способом, основанным на процессе отбортовки, получают 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. К недостаткам способа следует отнести наличие разнотолщинности, которая составляет до 20% и с увеличением пластичности материала в условиях максимального деформирования эта величина может возрасти. Согласно формулам (1.16) и (1.1) для реальных материалов $\psi_{из} \leq 0,45$. В этом случае разнотолщинность может достичь 40-45%.

Операция отбортовки, по мере выявления и расширения технологических возможностей, начинает все шире применяться в различных отраслях промышленности. Этот способ подходит для производства различного вида патрубков, переходников, фланцев, но и для корпусных деталей ответственного назначения. Например, относящийся к инструментальному, способ изготовления заключается в отбортовке сварной конической заготовки путем удерживания ее за фланец со стороны большого открытого торца (см. рисунок 1.9).

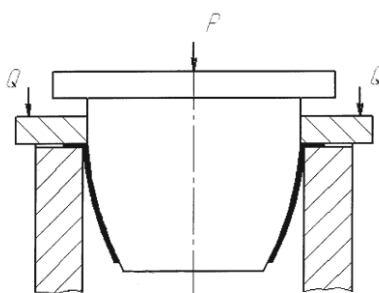


Рисунок 1.9 - Схема отбортовки в инструментальном штампе тонкостенных заготовок

Однако технологические возможности определяются предельным значением коэффициента отбортовки, а возникающее пружинение кромки большого торца требует значительных дополнительных трудозатрат: термофиксации [37,84]. Определим по известным формулам пружинение кромки при отбортовке, когда схема напряженно-деформированного состояния близка к линейной: ($\sigma_s \approx \sigma_p = 0, \sigma_\theta \neq 0, e_p = e_s, e_\theta = -2e_p = -2e_s$).

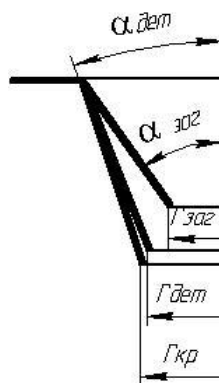


Рисунок 1.10 - Схема определения пружинения в процессе отбортовки

Известно, что величина упругой деформации:

$$e_{упр} = \frac{\sigma_{икромк}}{E}, \quad (1.17)$$

$$\text{где } \sigma_{икромк} = \sigma_{ТО} + \Pi e_{\theta_{икромки}} = \sigma_{ТО} + \Pi \ln \left| \frac{r_{кромки}}{r_{заг}} \right|;$$

$\sigma_{икромк}$ - 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:

$$e_{упр} = \ln \left| \frac{r_{дет}}{r_{кромки}} \right|, \quad (1.18)$$

где $r_{дет}$ - радиус детали.

Следовательно, радиус детали из равенства формул (1.17) и (1.18):

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

Разница в радиусах составит:

$$\Delta r = r_{кромки} - r_{дет} = r_{кромки} \left[1 - \exp \left(- \frac{\sigma_{икромк}}{E} \right) \right]. \quad (1.19)$$

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

Детали, полученные предлагаемым способом, обладают разнотолщинностью, подвергаются механической обработке, имеют весьма значительный припуск по толщине, в связи, с чем возникает необходимость использования заготовки из листа завышенной толщины, что сопровождается перерасходом металла.

Специальные способы, с применением эластичной среды, также подходят для штамповки выпуклых деталей. Но, сжимающие напряжения в меридиональном направлении σ_p , действующие вдоль образующей заготовки, при достижении некоторых критических значений приводят к потере устойчивости стенки заготовки и возникновению поперечных складок. Такие складки или гофры являются неисправимым браком. Возможным способом предотвращения потери устойчивости является локализация действующих сил, т.е. оптимизация воздействия инструмента на заготовку за счет конструкции эластичного инструмента [10] (см. рисунок 1.11).

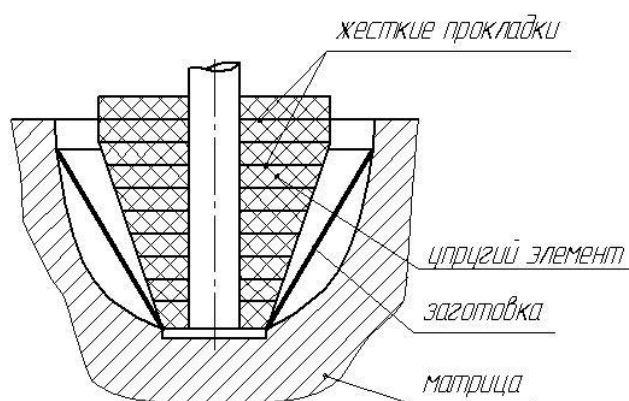
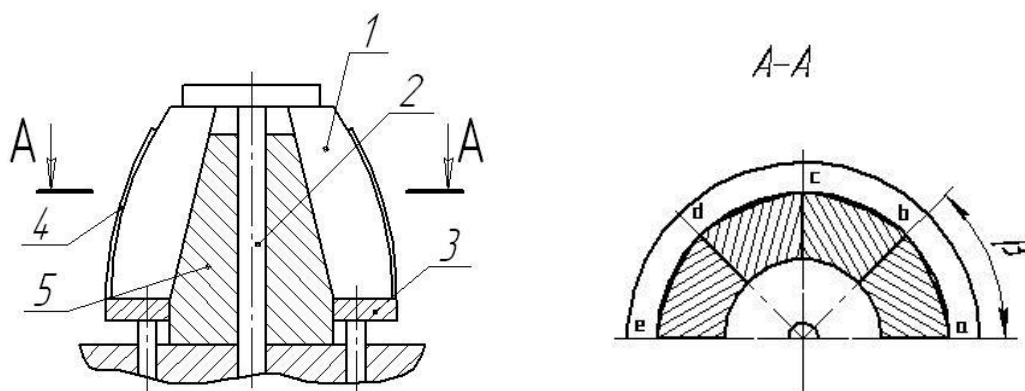


Рисунок 1.11 - Процесс штамповки деталей эластичным инструментом

Сущность способа заключается в последовательном деформировании заготовки в форме направленной волны. При этом в начале процесса локальным давлением эластичной среды формируется небольшой участок заготовки, величина которого обеспечивает устойчивость без складкообразования. С нарастанием усилия пресса зона нагружения заготовки и очаг деформирования последовательно распространяются вдоль оси заготовки до полного оформления детали по контуру матрицы. Такая схема процесса осуществляется в течение одного хода пресса при использовании пуансона, состоящего из кольцевых эластичных элементов

(шайб) с различными характеристиками сжатия, т.е. с переменной жесткостью на сжатие. При этом в верхней части пуансона должны располагаться эластичные шайбы с большей жесткостью, а размеры пуансона в исходном положении должны обеспечивать нарастающий кверху зазор между заготовкой и пуансоном. Необходимое увеличение жесткости в верхней части пуансона достигается за счет применения более твердых марок эластичных сред или уменьшения толщины эластичных шайб с постановкой между ними металлических прокладок. В процессе формования детали таким пуансоном в каждый данный момент времени деформируется небольшой участок заготовки с размерами, не допускающими потери устойчивости. Часть заготовки, лежащая ниже этого участка, является уже отформованной и прижатой эластичной средой к матрице, а верхняя часть еще не контактирует с пуансоном. Она в процессе формовки свободно подтягивается в зону деформирования, что снижает утонение стенки детали и увеличивает предельную степень формоизменения заготовки за один переход [21]. Однако не исключена для тонких заготовок потеря устойчивости свободной части, так как она деформируется в условиях напряженно-деформируемой схемы близкой к процессу вытяжки, где действуют сжимающие тангенциальные напряжения.

Существующая технология с использованием деформирования разжимными секционными пуансонами [11,16,65,90] 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 рисунке 1.12 и механизм огранки состоит в следующем.



1 - сегменты растяжных пуансонов; 2 - шток; 3 - выталкиватель; 4 - заготовка; 5 - конус

Рисунок 1.12 - Штамп для обтяжки с помощью разжимного пуансона

В исходном положении, когда сегменты сжаты, заготовка касается тех участков на рабочей поверхности сегментов, которые соприкасаются друг с другом (точки a,b,c,d,e; сечение A-A). При этом в виду того, что радиусы рабочей поверхности сегментов в тангенциальном (широтном) направлении больше соответствующих радиусов заготовки, остальные части заготовки свободны от прилегания к деформирующему инструменту (сегментам), образуя прогиб f (см. рисунок 1.13). При движении сегментов вниз по конусу 5 (см. рисунок 1.23) между сегментами образуется зазор, и деформацию в первую очередь получают элементы заготовки в зоне, прилегающей к точкам a,b,c,d,e, за счет уменьшения радиуса кривизны (изгиба). Эти элементы заготовки к моменту окончания процесса получают наибольшую деформацию и, следовательно, наклеп. Поэтому при упругой разгрузке в результате неравномерных остаточных деформаций в широтном направлении образуется огранка. Т.е., в этих места, 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 (см. рисунок 1.13).

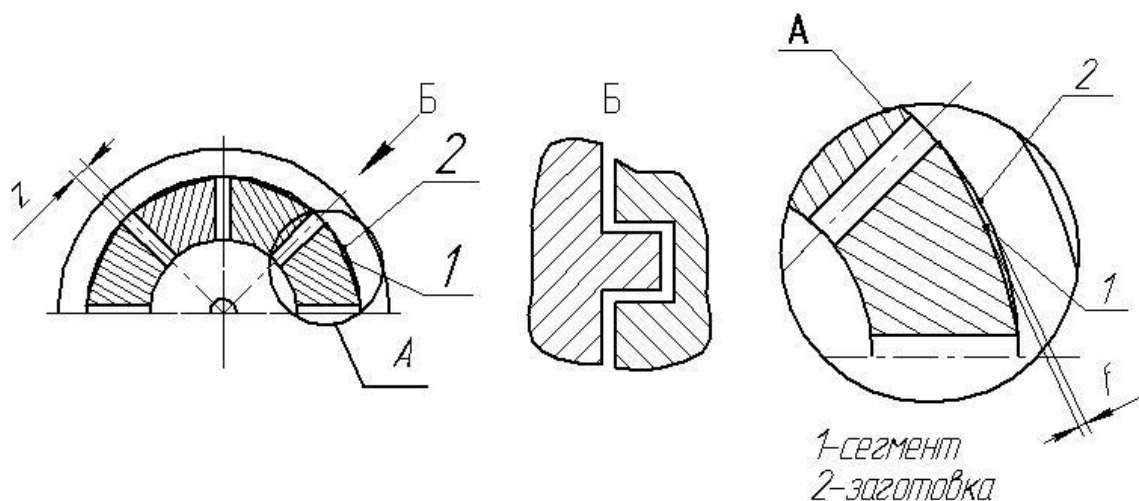


Рисунок 1.13 - Конструкция сегментов с гребешками

Кроме того, к недостаткам способа следует отнести неравномерность распределения толщины детали в обоих направлениях, которая по толщине в отдельных случаях достигает 15-20% [14,32,67]. 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 [32] 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 потребуется две, а для стали 30ХГСА — три операции с промежуточными отжигами. Как и всякий другой технологический процесс, процесс обтяжки имеет свои ограничения, определяемые степенью деформации того или иного материала, которую он может претерпевать без разрушения. Если степень деформации, которая необходима для полной обтяжки детали данной геометрической формы, больше, чем это допускается пластичностью материала, произвести обтяжку за один переход не 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 рисунке 1.14.

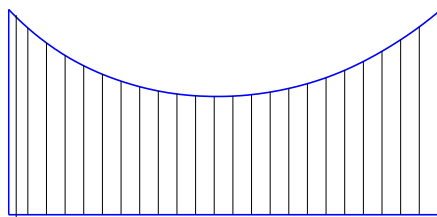


Рисунок 1.14 - Характер изменения толщин тонкостенных осесимметричных деталей, получаемых способом обтяжки с помощью разжимных пуансонов

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, модернизации его. Так, например, для повышения технологических возможностей в работе [77] предложен разжимной пуансон, который содержит секторы в виде упругих конических колец со сквозной конической прорезью. В качестве материала для изготовления упругих конических колец применили сталь с высоким пределом прочности. Применение конструкции, описываемой в [77], направлено на повышение качества изготавливаемых деталей за счет устранения штамповочных следов, возникающих на стыке секторов и клиньев. В работе [7] деформирование разжимными 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.

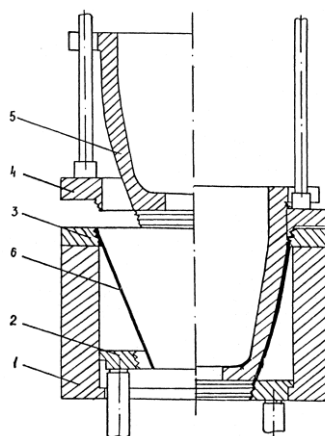
Таким образом, разработка новых способов для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы и создание ресурсосберегающих, научно обоснованных технологий, повышающих производительность труда, качество продукции является важнейшей задачей современной промышленности. Рассмотрим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

эластичных элементов и способы формообразования, направленные на получение деталей с минимальной разнотолщинностью, которые эффективно внедрить в производстве летательных аппаратов (и как показали исследования - это способы см. рисунок 1.15,1.16,1.17,1.18,1.19,1.24).

Для высоких конических деталей целесообразно использование устройств и способов см. рисунок 1.15,1.21,1.19,1.24,1.25,1.26. Их недостатком является наличие технологического припуска под прижим заготовки по контурам большего и малого оснований. Для высоких выпуклых и вогнутых сужающихся деталей рекомендуемые способы см. рисунок 1.21,1.23,1.25,1.27. Устройство по схеме см. рисунок 1.25 позволяет изготовить детали 1 ряда без цилиндрических участков (1а,1б,1с) и детали 2 ряда с цилиндрическим участком на малом основании (2а, 2б, 2с). Однако в этом случае необходимо обеспечить небольшую разницу в диаметрах оснований, иначе получается деталь с равномерной толщиной стенки при высоте намного короче высоты используемой заготовки, что приводит к снижению КИМ из-за необходимости удаления технологического припуска.

Для деталей с цилиндрическим участком на большем основании (3а, 3б, 3с) эффективен способ см. рисунок 1.27. Чтобы получить равномерную толщину стенки деталей по цилиндрическому участку малого основания (2а, 2б, 2с), целесообразно применить способ см. рисунок 1.19. Устройство см. рисунок 1.26 подходит для деталей бочкообразной выпуклой и вогнутой формы, как с цилиндрическими участками, так и без них.

- Заявленный способ, основанный на процессах отбортовки-формовки [8] из сварной листовой заготовки считался одним из наиболее перспективных (см. рисунок 1.15) 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.



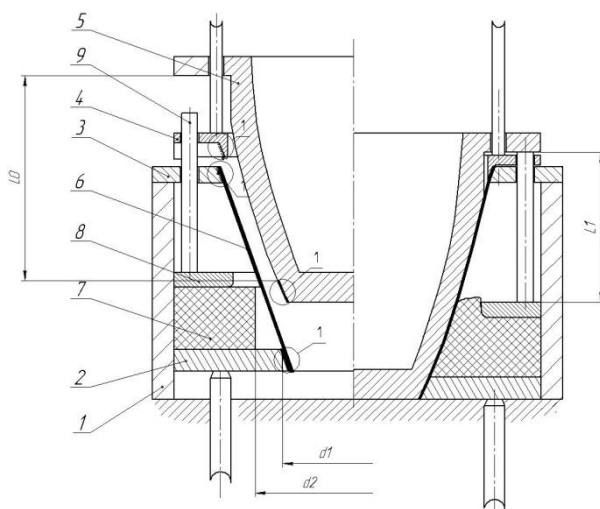
1 - подкладная плита; 2 - выталкиватель; 3 - матрица; 4 - прижим;
5 - пуансон; 6 - заготовка

Рисунок 1.15 - Способ штамповки отбортовки – формовки (А.с. 1748905 СССР № 4760202)

Оснастка, изображенная на рисунке 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 формующего инструмента станет равным высоте исходной заготовки, считая от плоскости ее большого торца. С этого момента усилие растяжения вдоль образующей прикладывается по всей заготовке, идет процесс формовки, который заканчивается при увеличении высоты заготовки на 5-10%. Такая степень деформации достаточна, чтобы после снятия усилия в заготовке наблюдалась высокая равномерность

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

- Задача получения деталей выпуклой формы с постоянной толщиной может быть решена иначе [81]. В сравнении с предыдущим способом предложено использование эластичного элемента в зоне малого диаметра, который блокирует опасное сечение силами трения, тем самым расширяя возможности формообразования. Целесообразно применение для оболочек сильно сужающейся формы (с большой разницей между большим и малым диаметрами).



1 - подкладная плита; 2 - выталкиватель; 3 - матрица; 4 - прижим; 5 - пуансон; 6 - заготовка; 7 - эластичный элемент; 8 - толкатель; 9 – шпилька
Рисунок 1.16 - Устройство для формообразования оболочек сужающейся формы (Патент 58055- 2006117037/22)

Устройство состоит (см. рисунок 1.16) 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 деформировался свободно от зажима. В тот момент, когда нижняя поверхность фланца пуансона 5 достигает уровня дополнительных шпилек 9, усилие от пуансона начинает передаваться на эластичный элемент 7, деформируя его. Деформация его заключается в осадке – уменьшении высоты и увеличении широтных размеров. При этом увеличиваются и размеры самой заготовки, происходит деформация в условиях схемы напряженно-деформированного состояния, соответствующего процессу формовки. Т.е. деформирование происходит за счет утонения заготовки. Это обеспечивается тем, что длина шпильки 9 L_1 несколько больше, чем длина рабочей части пуансона L_0 . При дальнейшем ходе пуансона 5 происходит деформирование заготовки 6, в очаг деформации включается вся большая часть заготовки, и всё больше увеличивает свои

размеры эластичный элемент. Перед завершением процесса деформирования заготовки, когда пуансон достигает нижнего выталкивателя, происходит зажим заготовки по малому торцу между нижней частью пуансона 5 и выталкивателем 2. С этого момента усилие растяжения вдоль образующей прикладывается к обоим торцам заготовки. Величина деформации эластичного элемента 7, установленного внутри подкладной плиты, зависит от его исходной высоты, а также от длины дополнительных толкателей, через которые усилие деформирования передаётся на эластичный элемент. При сжатии элемента 7 заготовка 6 прижимается к рабочей поверхности пуансона 5. Силы трения, возникающие между заготовкой 6 и пуансоном 5, блокируют перемещение элементов заготовки 6, находящихся на ее меньшем основании и препятствуют утонению заготовки. Увеличивается растяжение и утонение элементов заготовки, примыкающих к большому основанию, в результате чего равномерность толщины стенки штампованной детали значительно повышается.

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

Надо отметить, что в приведенных способах процесс отбортовки нецелесообразен, так как он усложняет возможность достижения равномерной толщины детали. При этом важным фактором в рассматриваемых способах является трение [15,31,33,50,61,102]. В источниках [30,92] приведена величина коэффициента трения со смазкой и без смазки:

Таблица 1.1 - Величины коэффициентов трения со смазкой и без смазки

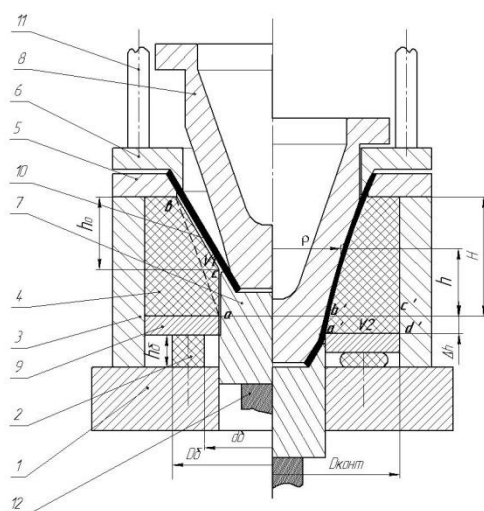
Условия процесса	Коэффициенты трения в зависимости от вытягиваемых материалов		
	Сталь 08ВГ	Алюминий	Дуралюмин Д16 М
Без смазки	0,18-0,20	0,25	0,22
Смазка- минеральное масло (машинное, веретенное)	0,14-0,16	0,15	0,16
Смазка с наполнителями (мел, графит)	0,06-0,1	0,1	0,08-0,1

В работе [71] проведены эксперименты и определен коэффициент трения при различных условиях трения на поверхности контакта нержавеющей и инструментальной стали. Полученные результаты представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Значения коэффициентов трения на поверхности контакта нержавеющей и инструментальной стали

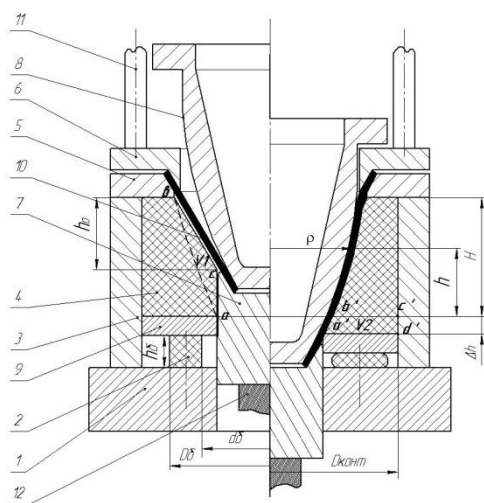
Условия трения	Величина нормального усилия (Н)	Коэффициент трения
Без смазки	180	0,24
-	500	0,23
Сухое детское мыло	180	0,14
-	500	0,11
Жидкое мыло и порошок политетрафторэтилен	180	0,19
-	500	0,15
Лак Цапон-10 и сухое мыло	320	0,07
-	500	0,07

- С технической и экономической точек зрения очень важно проектировать технологический процесс так, чтобы он направленно изменял толщину заготовки [38,87]. Для достижения поставленной цели предлагается усовершенствованное устройство, обладающее большими возможностями и более простым механизмом формообразования тонкостенных осесимметричных деталей с использованием процесса формовки [74]. На рисунках 1.17 и 1.18 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) [41,42,82].



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 1.17 - 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 1.18 - Устройство для формообразования тонкостенных усеченных сужающихся оболочек (Патент 102543 - 2010140398)

Устройство, содержащее пуансон 8, контейнер 3, прижим 6, выталкиватель 7, матрицу 5, согласно модели, снабжено плитой штампа 1, на

которую установлен контейнер 3, внутри него на плите штампа расположен эластичный элемент 4, размещённый на подкладной плите. Давление эластичным элементом создается с помощью подкладной плиты, усилие подпора которой определяется с помощью буферного устройства (либо прессы, либо штампа, что определяется необходимостью промышленного производства или эксперимента). Эластичный элемент выполнен в виде кольца прямоугольного сечения высотой h , которая больше на 5-10% рабочей части поверхности пуансона, со срезанной со стороны пуансона частью в виде конического сечения с углом конусности равным углу конусности заготовки. Большой диаметр эластичного элемента равен внутреннему диаметру матрицы, а меньший диаметр равен диаметру выталкивателя. Заготовка, в виде усечённого конуса устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 5, а 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, совпадающей с конусностью заготовки. Такая геометрия позволяет надежно закрепить заготовку до момента пластического деформирования. Пуансон перемещается вниз, вытесняя часть объема эластичного элемента V_1 , который перемещает подкладную плиту 9 вниз. Давление, которое создается внутри эластичного элемента, определяется усилием подпора буферного устройства 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

- В основу нового устройства заложена задача [82]: повысить качество заготовок и изготовить детали с равномерной толщиной (см. рисунок 1.19).

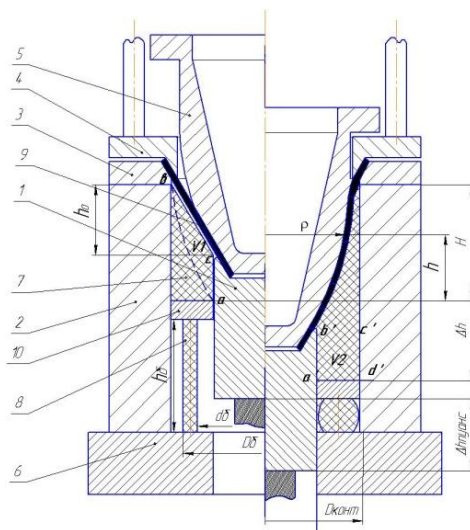


Рисунок 1.19 - Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей выпуклой формы (Патент 78709 - 2008112698)

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 прилегающие 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, совпадающей 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.

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 подкладную 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:

$$\frac{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)}{4} q = \frac{\pi(D_{\text{б}}^2 - d_{\text{б}}^2)}{4} q_{\text{б}}, \quad (1.20)$$

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 (1.20) находим:

$$q_{\text{б}} = q \frac{D_{\text{конт}}^2 - d^2}{D_{\text{б}}^2 - d_{\text{б}}^2}, \quad (1.21)$$

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

$$\frac{V_1}{V_{\text{эл. элем.}}} \leq \varepsilon \leq 0,25, \quad (1.22)$$

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

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

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;

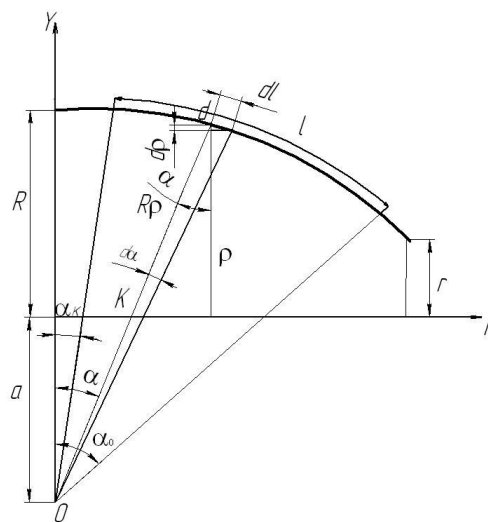
$h_{\text{эл. цил.}}$ - высота эластичного цилиндра.

$$V_{цил} = \frac{\pi}{4} d^2 (h_{дет} - h_0), \quad (1.23)$$

$$V_{кон} = \frac{\pi}{12} h_0 (D^2 + Dd + d^2). \quad (1.24)$$

Определим диаметр контейнера с учетом записи (1.22):

$$D_{конт} = \left(\frac{V_1}{\varepsilon} + V_{кон} + V_{цил} \right) \frac{4}{h_{эл.цил} \cdot \pi}. \quad (1.25)$$



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

Рисунок 1.20 - Геометрическая схема детали выпуклой формы для определения объема и площади детали

Объем смещенной части эластичного элемента при формообразовании выпуклой детали вычисляется:

$$V_1 = V_{дет} - V_{цил} - V_{кон} , \quad (1.26)$$

где $V_{дет}$ - объем, детали без учета припусков под зажимы, равный (см. рисунок 1.20):

$$V_{дет} = 2 \rho \pi R_{\rho}^2 a (\alpha_0 - \alpha_k) - \frac{\pi R_{\rho}^3}{2} (\alpha_0 - \alpha_k + 0,5 \sin 2\alpha_0 - 0,5 \sin 2\alpha_k) - 2 \pi R_{\rho} a^2 (\alpha_0 - \alpha_k) , \quad (1.27)$$

где:

$$\sin \alpha_k = \sin \alpha_0 - \frac{h_{дет}}{R_{\rho}} . \quad (1.28)$$

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:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_{\delta}}{h_{\delta}} , \quad (1.29)$$

где Δh_{δ} - величина сжатия эластичного буфера.

Последние соотношения позволяют определить высоту эластичного буфера:

$$\frac{(D_{\delta} - d_{\delta})}{M} = h_{\delta} , \quad (1.30)$$

$$h_{\delta} = \frac{\Delta h_{\delta}}{\varepsilon} . \quad (1.31)$$

Приравняв два последних равенства, получим:

$$M = \frac{\Delta h_{\delta}}{\varepsilon (D_{\delta} - d_{\delta})} . \quad (1.32)$$

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:

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

Из условия равенства $v_1 = v_2$ находим:

$$\Delta h_{\delta} = \frac{4V_1}{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)}. \quad (1.33)$$

Далее по номограмме выбирают точку пересечения трех линий: горизонтальной прямой, соответствующей давлению эластичного буфера; вертикальной прямой, соответствующей выбранному значению деформации сжатия буфера; кривой зависимости $q_{\delta} = f(\varepsilon)$ при геометрическом соотношении m . Причем значения m и ε должны удовлетворять зависимости (1.32). По формулам (1.30, 1.31) определялась 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_{δ} больше величины перемещения пуансона Δh :

$$\Delta h_{\delta} = \frac{4V_1}{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)} \geq \Delta h. \quad (1.34)$$

Из выражения (1.34) найдем величину диаметра контейнера,

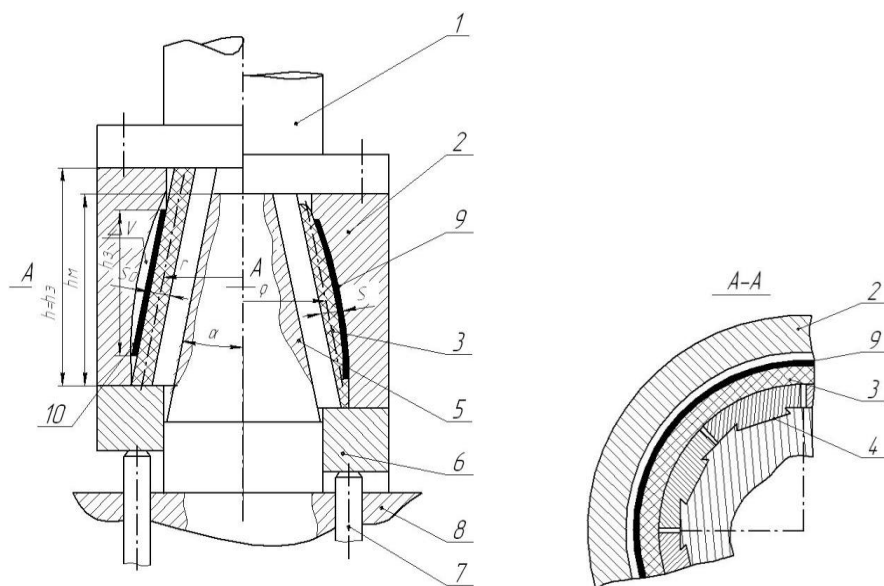
удовлетворяющую выполнению условия:

$$D_{\text{конт}} = \sqrt{\frac{4V_1}{\pi \Delta h_6} + d^2}. \quad (1.35)$$

Использование устройства предлагаемой конструкции позволяет формировать тонкостенных осесимметричных 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.

- Получение качественной тонкостенной осесимметричной детали усеченной сужающейся формы без огранки за один ход прессы, возможно достичь за счет устройства (см. рисунок 1.21), 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 прессы 8 [76]. Устройство работает следующим образом. Опорное кольцо 6 поднято вверх. Пуансон с матрицей отведены кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки 10. Раздвижные секторы 4 подняты вверх вместе с эластичным элементом 3. В этом положении устанавливают конусную заготовку сверху на эластичный элемент. Далее опускается пуансон с матрицей до упора на опорное кольцо 6. При этом рабочие поверхности в элементах наибольшего и наименьшего диаметров касаются эластичного элемента. Рабочая поверхность матрицы h_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 4 и эластичного элемента 3 вместе с заготовкой 10. Секторы, опускаясь вниз по конусу 5, увеличиваются в диаметре. При этом увеличиваются 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.



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

Рисунок 1.21 - Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы (Патент 128527 - 2012147877)

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, увеличивает диаметр и уменьшает толщину, то есть соответствует условию плоского деформированного состояния, когда деформация по толщине ε_s равна по величине и противоположна по знаку деформации увеличения диаметра эластичного элемента ε_θ . Приблизительно можно записать, считая выполнения условия постоянства объема для эластичного элемента:

$$\varepsilon_s \approx -\varepsilon_\theta \text{ или } \frac{\rho - r}{r} \approx -\frac{S - S_0}{S_0}, \quad (1.36)$$

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

S_0, S - соответственно толщины средние по очагу до и после деформации.

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

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

$$\pi \frac{(\rho^2 - r^2)^2}{\cos \alpha} h_m = \Delta V, \quad (1.37)$$

где h_m - высота рабочей поверхности матрицы;

α - угол конусности конуса.

Выразим r из (1.36) и, подставив его в (1.37) после преобразований получим:

$$\rho = \left(2 - \frac{S}{S_0} \right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m} \left[\left(2 - \frac{S}{S_0} \right)^2 + 1 \right]}. \quad (1.38)$$

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

$$S = 2 \left\{ \rho_{\partial} - \left(2 - \frac{S}{S_0} \right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_{\text{м}} \left[\left(2 - \frac{S}{S_0} \right)^2 + 1 \right]}} \right\}. \quad (1.39)$$

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

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

$$S_0 = \frac{S}{k}, \text{ где}$$

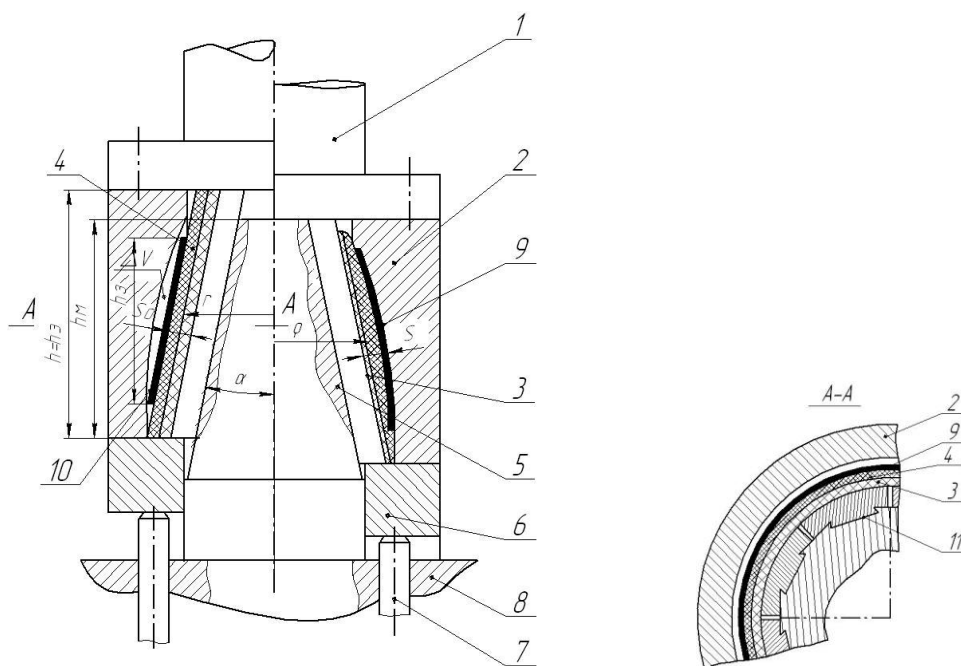
$$S = 2 \left\{ \rho_{\partial} - (2 - k) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_{\text{м}} [(2 - k)^2 + 1]}} \right\},$$

где ρ_{∂} – средний радиус детали.

- На основе выше рассмотренного устройства [76] (см. рисунок 1.21) предложено усовершенствованное (см. рисунок 1.22), отличающееся наличием эластичного элемента в виде двух конических оболочек 3 и 4. Состоящее все так же из пуансона 1, жестко соединенного с матрицей 2, конуса с направляющими пазами 5, опорного кольца 6, шпилек 7, установленных в плиту пресса 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 касается эластичного элемента. Рабочая поверхность матрицы $h_{\text{м}}$ 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 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 увеличиваются 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.



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

Рисунок 1.22 - Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы

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, увеличивает диаметр и уменьшает толщину, то есть соответствует условию плоского деформированного состояния, когда деформация по толщине ε_s равна по величине и противоположна по знаку деформации увеличения диаметра эластичного элемента ε_θ . Приближенно можно записать, считая выполнения условия постоянства объема для эластичного элемента в виде двух конических оболочек:

$$\varepsilon_s \approx -\varepsilon_\theta \text{ или } \frac{\rho - r}{r} \approx -\frac{S - S_0}{S_0}, \quad (1.40)$$

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

S_0, S - соответственно толщины эластичного элемента (в виде двух конических оболочек) средние по очагу до и после деформации.

Несмотря на уменьшение толщины эластичного элемента в виде двух конических оболочек, прирост объема ΔV_p 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 .

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

$$\pi \frac{(\rho^2 - r^2)^2}{\cos \alpha} h_m = \Delta V, \quad (1.41)$$

где h_m - высота рабочей поверхности матрицы;

α - угол конусности конуса.

Выразим r из (1.40) и, подставив его в (1.41) после преобразований получим:

$$\rho = \left(2 - \frac{S}{S_0} \right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m} \left[\left(2 - \frac{S}{S_0} \right)^2 + 1 \right]}. \quad (1.42)$$

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

$$S = 2 \left\{ \rho_0 - \left(2 - \frac{S}{S_0} \right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m \left[\left(2 - \frac{S}{S_0} \right)^2 + 1 \right]}} \right\}. \quad (1.43)$$

Исходную толщину эластичного элемента в виде двух конических оболочек найдем, поставив ограничения по степени деформации:

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

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

$$S_1 + S_2 = 2 \left\{ \rho_0 - (2 - k) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m \left[(2 - k)^2 + 1 \right]}} \right\},$$

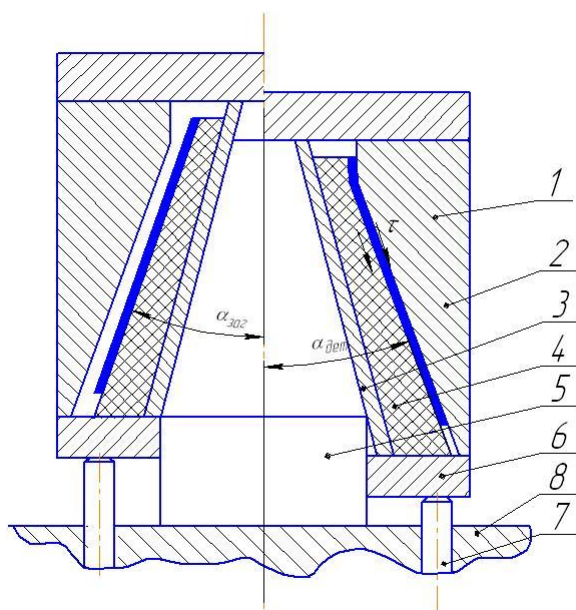
где ρ_0 - средний радиус детали;

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 (см. рисунок 1.23) и его суть состоит в следующем.



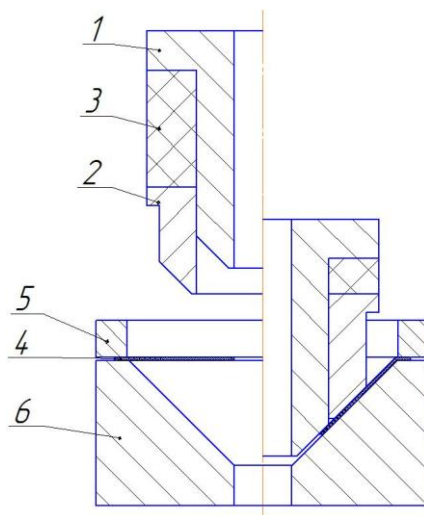
1 - верхняя плита штампа; 2 - матрица; 3 - раздвижные сектора; 4 - эластичный элемент; 5 - конус; 6 - опорное кольцо; 7 - шпилька; 8 - нижняя плита штампа

Рисунок 1.23 - Способ формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы и устройство для его осуществления (для получения детали с равномерной толщиной)

Опорное кольцо 6 поднято вверх. Матрица отведена кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки. Раздвижные секторы 3 подняты вверх вместе с эластичным элементом 4. В этом положении устанавливают конусную заготовку сверху на эластичный элемент. Элементы заготовки наименьшего и наибольшего диаметров деформируются путем отбортовки. При опускании раздвижных секторов 3 происходит увеличение диаметров эластичного элемента 4, который выполнен в виде конической оболочки постоянной толщины. Угол конусности внутренней поверхности эластичного элемента равен углу конусности конуса с направляющими пазами, а наружная поверхность меньше угла конусности образующей рабочей поверхности матрицы. Вследствие такой формы в первую очередь начинают деформироваться элементы конической заготовки меньшего диаметра. Они

прижимаются к рабочей поверхности матрицы меньшего диаметра при раздаче заготовки, и при этом происходит отбортовка кромки наименьшего диаметра. Такой механизм обеспечивается благодаря тому, что угол конусности заготовки больше угла конусности эластичного элемента. Однако расстояние между заготовкой и рабочей поверхностью матрицы увеличивается по мере увеличения радиуса заготовки. При такой компоновке возникающие силы трения, действующие на заготовку, как со стороны матрицы, так и со стороны эластичного элемента направлены в сторону наибольшего диаметра заготовки. Предложенная последовательность деформирования позволяет создавать практически одинаковые деформации элементов заготовки по толщине и получать детали различной формы: конической, выпуклой, вогнутой с равномерной толщиной стенки. Получение конической детали с высоким качеством соответствия размеров требует деформации элементов до 5-10% (это необходимо, чтобы все элементы и в зоне сварного шва продеформировались, приняв форму матрицы). В этом случае механизм процесса должен учесть то обстоятельство, что при абсолютном одинаковом увеличении диаметров заготовки величины деформаций элементов будут разными: наибольшая - для элементов зоны наименьшего диаметра, а наименьшая - в элементах зоны большего диаметра. Одинаковое перемещение в радиальном направлении объясняется работой устройства с разжимными секторами, двигаясь вниз и увеличиваясь в диаметре, они увлекают и эластичную среду, и заготовку. Можно допустить, что все элементы заготовки перемещаются параллельно оси устройства на одинаковую величину. Для того, чтобы получить деталь из заготовки, которая имеет одинаковую (равномерную) толщину, угол конусности заготовки должен быть меньше угла конусности детали. При этом элементы зоны большего диаметра получают и большее абсолютное перемещение, позволяющее приблизить величины деформаций к элементам, находящемуся в зоне малого диаметра.

- Для формообразования кольцевой тонкостенной заготовки (см. рисунок 1.24) предложено разработанное устройство [75], содержащее внутренний пуансон 1, наружный пуансон 2, эластичный буфер 3, заготовку 4, прижим 5 и матрицу 6.



1 - внутренний пуансон; 2 - наружный пуансон; 3 - эластичный буфер;
4 - заготовка; 5 - прижим; 6 - матрица

Рисунок 1.24 - Устройство для формообразования кольцевой тонкостенной заготовки (Патент 115256 - 2011144942)

Заготовка жестко зажимается по кромке. Усилие действует на наружный пуансон 2, эластичный буфер 3 сжимается и передает действие на внутренний пуансон 1. В результате происходит формовка для периферийной части кольцевой заготовки, а для внутренних элементов кольцевой заготовки отбортовка.

Чтобы предотвратить гофрообразование, используется прижим, так как заготовка тонкостенная. На начальном этапе происходит формовка для периферийной части заготовки за счет того, что $d_1 \gg d_0$, поэтому отбортовка не реализуется, так как напряжений недостаточно для протекания этого процесса. При формовке из-за растягивающих напряжений кромки утоняются, радиусное отверстие же остается постоянным. Для случая, когда $d_2 \sim d_0$ под действием усилия начинает сжиматься эластичный буфер, пуансон движется вниз и происходит отбортовка. При отбортовке пластическую

деформацию получает часть заготовки, расположенная над отверстием матрицы. В процессе деформирования по мере опускания пуансона деформируемые элементы заготовки изгибаются на кромках пуансона и матрицы, диаметр отверстия увеличивается, а элементы заготовки перемещаются относительно пуансона в меридиональном направлении, постепенно приближаясь к стенке отверстия матрицы.

- 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 устранив механическую обработку. Схема производства, основанная на способе формовки с применением эластичного элемента, представлена на рисунке 1.25 и реализуются 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:

$$r_{заг} = const \quad .$$

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

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 минимальному значению зазора Δ и созданию условий, при которых заготовка не выскальзывала бы. Поэтому радиус закругления матрицы выбирается с учетом изгиба [97].

- Предложен способ для изготовления качественной тонкостенной осесимметричной детали бочкообразной формы без огранки с минимальной разнотолщинностью за один ход прессы, повышающий коэффициент использования материала (см. рисунок 1.26) .

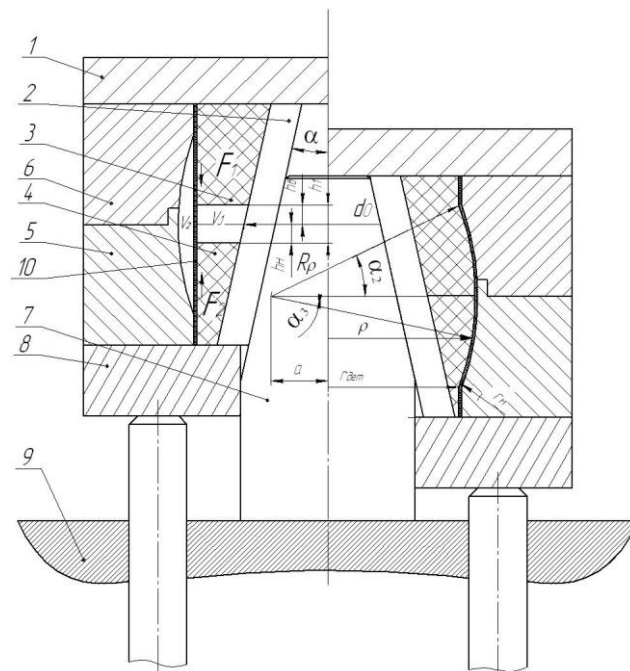
Устройство содержит (см. рисунок 1.26) под верхней плитой штампа 1 раздвижные сектора 2, эластичный элемент верхний 3, эластичный элемент нижний 4, матрицу 5,6, конус с направляющими пазами 7, опорное кольцо 8, установленные на плиту штампа 9.

Способ осуществляют следующим образом:

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. Обязательным является условие: высота раздвижных секторов и общая высота 2-х 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, расположенных по торцам заготовки, деформирующихся идвигающихся одновременно на встречу 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:

$$r_{заг} = const .$$



1 - верхняя плита штампа; 2 - раздвижные сектора; 3 - эластичный элемент верхний; 4 - эластичный элемент нижний; 5 - матрица; 6 - матрица; 7 - конус; 8 - опорное кольцо; 9 - нижняя плита; 10 - деталь
Рисунок 1.26 - Способ формообразования тонкостенной осесимметричной детали бочкообразной формы

Преимущество такой заготовки в том, что она получается из полосы гибкой и сваркой в сравнении с традиционными коническими заготовками из секторов. Это позволяет в первую очередь 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 на встречу 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 разнотолщиной, 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.

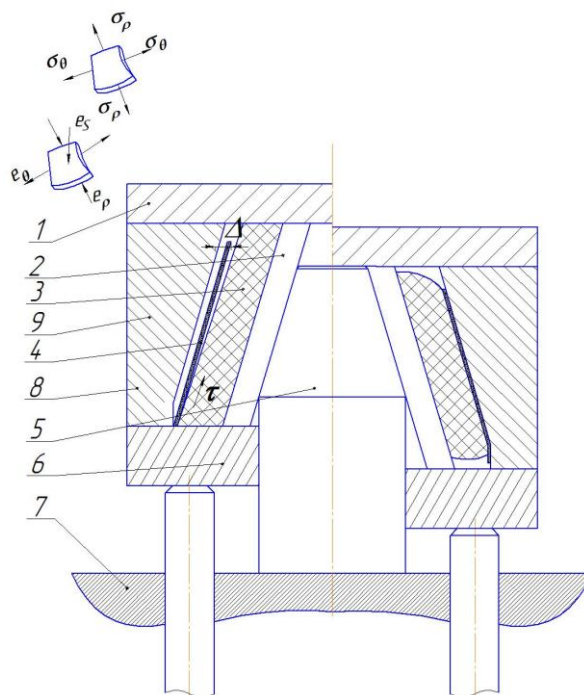
Величина силы трения зависит от давления на площадь контакта и от коэффициента трения. Для особо выпуклой детали необходимо использовать высокие показатели давления и трения (например, более твердую эластичную среду).

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 (см. рисунок 1.27).

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.



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

Рисунок 1.27 - Способ формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы на основе процесса отбортовки

2 Теоретический анализ процесса формообразования

Получить равномерную толщину детали возможно при наличии активных сил трения и выполнив условие [83]:

$$\iint_F (S_T - S_{зад})^2 dF \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

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 (2.1), условие для осесимметричной детали может быть представлено как:

$$\int_l (S_T - S_{зад})^2 dl \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

где l - длина образующей детали.

Выражение (2.2) является функционалом [53]. Он требует приближение технологически возможной толщины s_T к заданной толщине детали $s_{зад}$ при условии минимального отклонения как со стороны положительной, так и отрицательной разницы между двумя функциями толщин. Выполнение условия (2.2), дает возможность увеличить КИМ, уменьшить трудоемкость и повысить эксплуатационные характеристики детали, что доказано в работах [12,87,88]. 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 $s_{зад} = s_{дем} = const$.

2.1 Анализ напряженно-деформированного состояния

Введем некоторые общие допущения для всех рассматриваемых в работе способов (см. рисунок 1.15,1.16,1.17,1.18,1.19,1.21,1.22,1.23,1.24,1.25,1.26, 1.27).

Основные допущения

- Традиционные допущения [30].
- Материал считаем трансверсально-изотропным телом [99].
- Трение учитывается по закону Кулона.

Используя инженерный метод решения для получения деталей с минимальной разнотолщинностью, выполняем условие (2.2). Для решения функционала необходимо найти технологическую толщину s_T с учетом принятых допущений. Минимизацию выражения (2.2), 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 внешнем 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 [19,29,99]. При решении инженерным методом, уравнение равновесия в полярной системе координат для случая формообразования заготовки, в заключительной стадии процесса с использованием эластичного элемента примет вид [101,85]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{f\rho}{\sin \alpha} \left[\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{q \left(1 \mp \frac{f_1}{f} \right)}{S_T} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right] = 0, \quad (2.3)$$

где q - давление, создаваемое эластичным элементом;

R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении;

R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении;

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;

σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении;

f_1 - коэффициент трения между поверхностями заготовки и эластичным элементом;

f - коэффициент трения между поверхностями инструмента и заготовки;

α - угол наклона к касательной, проведенной к рассматриваемому элементу образующей с координатой ρ ;

$\mp$ - 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 поверхности 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.

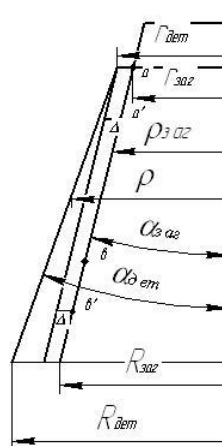
2.1.1 Исследование способа формообразования деталей из конической заготовки

Проведем анализ применительно к предложенным способам 1.21, 1.22, 1.23. 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:

$$S_T = S_{заг} \left[1 - (1 - \mu) \cdot \frac{\sigma_\rho / \sigma_\theta + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_\rho / \sigma_\theta} \left(\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{заг}} - 1 \right) \right], \quad (2.4)$$

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



$r_{дет}$ - 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

Рисунок 2.1 - Схема процесса

В выражении (2.4) соотношение $\frac{\bar{\rho}}{\rho_{заг}}$ представим в виде линейной зависимости:

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_{заг}} = c + l \bar{\rho} . \quad (2.5)$$

Из двух неизвестных коэффициентов, c определим из условия, что при $\rho = r_{дем}$ (см. рисунок 2.1):

$$\rho_{заг} = r_{дем} - \Delta . \quad (2.6)$$

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

$$\bar{\rho}_{заг} = 1 - \bar{\Delta} , \quad (2.7)$$

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

$$c = \frac{1}{1 - \bar{\Delta}} - l . \quad (2.8)$$

Подставим (2.8) в (2.5) и получим:

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_{заг}} = \frac{1}{1 - \bar{\Delta}} + l(\bar{\rho} - 1) . \quad (2.9)$$

Зная l и c можно найти наименьший и наибольший радиусы заготовки, используя (2.9):

$$\bar{\rho}_{заг} = \frac{\bar{\rho}}{\frac{1}{1 - \bar{\Delta}} + l(\bar{\rho} - 1)} . \quad (2.10)$$

Подставим (2.4) в (2.2) и получим условие минимальной разнотолщинности с

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

$\bar{R}_{дем}$:

$$\int_1^{\bar{R}_{дем}} \left\{ \bar{s}_{дем} - \left[1 - (1 - \mu) \cdot \frac{\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta} + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}} \left(\frac{1}{1 - \bar{\Delta}} + l(\bar{\rho} - 1) - 1 \right) \right] \right\}^2 d\bar{\rho} \rightarrow \min . \quad (2.11)$$

В выражении (2.11) соотношение напряжений будем считать величиной постоянной и равной среднему значению b :

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}, \quad (2.12)$$

где

$$b = \frac{\sigma_\rho / \sigma_\theta + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_\rho / \sigma_\theta}, \quad (2.13)$$

$$b_1 = 1 \text{ при } \bar{\rho} = 1; \sigma_\rho / \sigma_\theta = 0; \quad (2.14)$$

$$b_2 = \frac{(1 + f \cdot \text{ctg } \alpha_{\text{матр}}) \left(1 - \frac{1}{R_{\text{дет}}} \right) + 1}{1 - \mu \left(1 + f \cdot \text{ctg } \alpha_{\text{матр}} \right) \left(1 - \frac{1}{R_{\text{дет}}} \right)} \text{ при } \bar{\rho} = \bar{R}_{\text{дет}}. \quad (2.15)$$

Минимизацию выражения (2.11) проведем путем варьирования коэффициента l :

$$\frac{\partial}{\partial l} = \int_1^{\bar{R}_{\text{дет}}} \left\{ \bar{S}_{\text{дет}} - 1 - (1 - \mu)b + \frac{(1 - \mu)b}{(1 - \Delta)} + (1 - \mu)bl(\bar{\rho} - 1) \right\} (\bar{\rho} - 1) d\bar{\rho} = 0. \quad (2.16)$$

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

$$l = 3 \frac{1 + (1 - \mu)b - \bar{S}_{\text{дет}} - \frac{(1 - \mu)}{(1 - \Delta)}b}{2(\bar{R}_{\text{дет}} - 1)(1 - \mu)b}. \quad (2.17)$$

Чтобы вычислить l следует найти соотношение между $\bar{\Delta}$ и $\bar{S}_{\text{дет}}$; при $\bar{\rho} = r_{\text{дет}}$ или $\bar{\rho} = 1$. Из (2.4) имеем приравняв $\bar{S}_{\text{дет}} = \bar{S}_T$ и приняв соотношения:

$$r_{\text{дет}} - r_{\text{заг}} = \Delta \text{ или } 1 - \bar{r}_{\text{заг}} = \bar{\Delta} \text{ или } \bar{r}_{\text{заг}} = 1 - \bar{\Delta}.$$

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

отсюда

$$\bar{\Delta} = \frac{1 - \bar{S}_{\text{дет}}}{2 - \bar{S}_{\text{дет}} - \mu}. \quad (2.18)$$

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. рисунок 2.1) 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 заштылены и деформация происходит только для элементов, расположенных в зоне большего диаметра. В этом случае имеют место меридиональные напряжения, которые должны возрасть от свободной кромки большего диаметра к элементам зоны меньшего диаметра.

Таким образом, объединяющим фактором проводимых аналитических расчетов для способов 1.21, 1.22, 1.23 служит соотношение напряжений:

$$\sigma_\rho / \sigma_\theta = 0 .$$

Рассмотрим условия 1-ой стадии, при которых заготовка может скользить и деформироваться по коническому пуансону. Найдем напряжения согласно схеме действия сил (см. рисунок 2.2). Уравнение равновесия сил (2.3) при отсутствии трения по наружной поверхности и с учетом геометрических соотношений $R_\rho = \infty$, $\alpha_{\text{dem}} = \alpha_{\text{заг}} = \text{const}$ преобразуется:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta (1 + f \cdot \text{ctg } \alpha_{\text{dem}}) = 0 , \quad (2.19)$$

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:

$$\sigma_\theta = k \sigma_s = \sigma_s^* , \quad (2.20)$$

где σ_s - напряжение текучести;

k - коэффициент, равный $k = \sqrt{2} \sqrt{1 - \mu}$ [29];

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

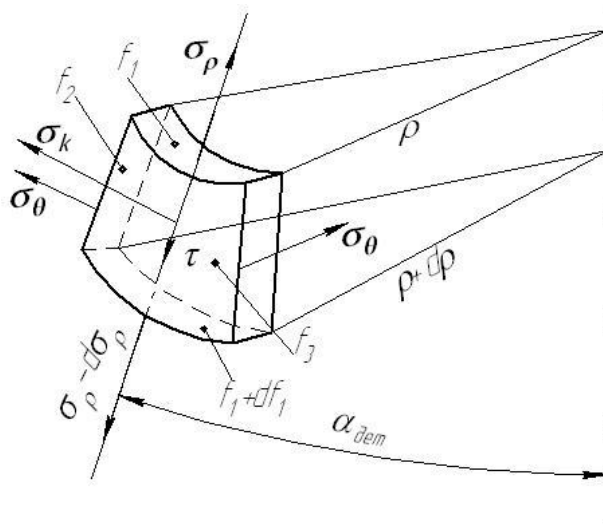
Решение (2.19) и (2.20) без учета упрочнения и изменения толщины примет вид:

$$\sigma_{\rho} = k \sigma_s (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}}) \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{R_{\text{дем}}} \right) \geq 0, \quad (2.21)$$

где $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r_{\text{дем}}}$; $\bar{R}_{\text{дем}} = \frac{R_{\text{дем}}}{r_{\text{дем}}}$.

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:

$$\sigma_{\rho} = k \sigma_s (1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}}) \left(1 - \frac{1}{\rho} \right) \geq 0, \quad (2.22)$$



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

Рисунок 2.2 - Схема действия сил на заготовку

Приравняв (2.21) и (2.22), получим:

$$(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}}) \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{R_{\text{дем}}} \right) = (1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}}) \left(1 - \frac{1}{\rho} \right). \quad (2.23)$$

Из (2.23) находим:

$$\bar{\rho} = \bar{R}_{\text{дем}} \frac{f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}}}{(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}})} + \sqrt{\left(\frac{f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}} \bar{R}_{\text{дем}}}{1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}}} \right)^2 + \bar{R}_{\text{дем}} \frac{1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}}}{1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дем}}}}. \quad (2.24)$$

По формуле (2.24) 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 (2.21) и (2.22), делаем вывод: возникновение сжимающих напряжений возможно при движении заготовки с пуансона к меньшему диаметру, если выполняется условие: $1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дет}} \leq 0$ или $f \geq \operatorname{tg} \alpha_{\text{дет}}$. Видно, что $\sigma_\rho \leq 0$ в том случае, если

$$1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дет}} \leq 0 \quad \text{или} \quad (2.25)$$

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

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

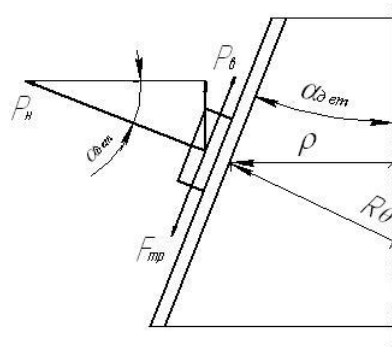


Рисунок 2.3 - Схема к определению условия, обеспечивающего деформацию заготовки

$$F_{\text{тр}} = P_n f ; \quad (2.26)$$

$$P_d = P_n \sin \alpha \cdot \cos \alpha_{\text{дет}} . \quad (2.27)$$

Из равенства формул (2.26) и (2.27) получим:

$$f \geq 0,5 \sin 2\alpha_{\text{дет}} , \quad (2.28)$$

где f - контактное трение заготовки;

P_n - суммарное усилие от давления, равное:

$$P_n = qF_{\text{дет}} = \frac{S_{\text{дет}} \sigma_s}{R_\theta} F_{\text{дет}} ,$$

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

$S_{дет}$ - толщина детали;

q - давление;

σ_{θ} - прочность материала;

R_{θ} - средний радиус в тангенциальном направлении.

Построим графики по формулам (2.25) и (2.28).

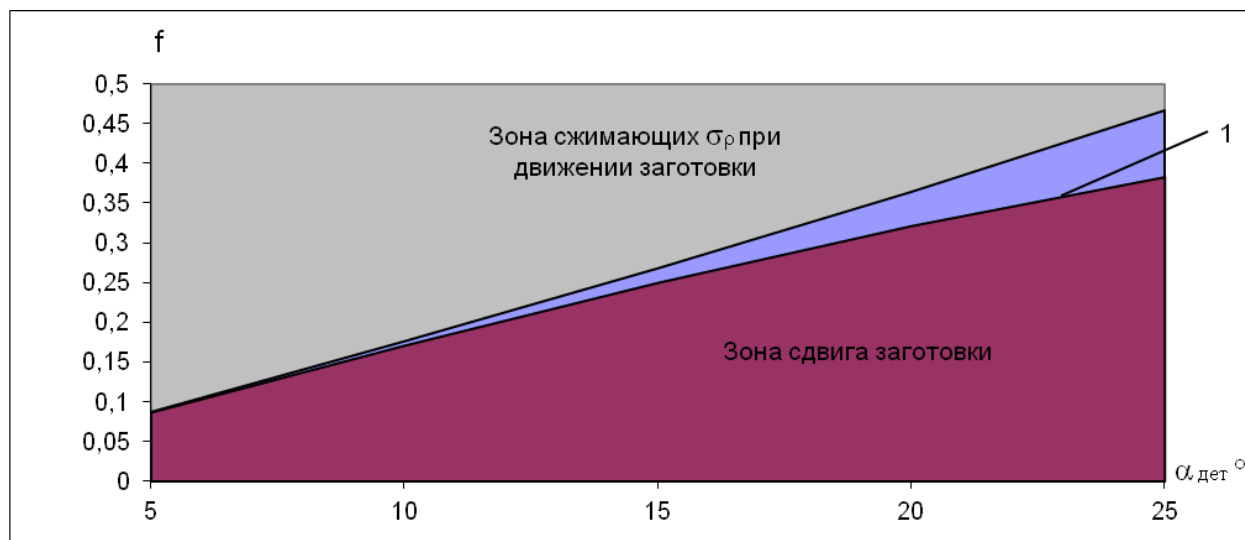


Рисунок 2.4 - Соотношение коэффициента трения и угла конусности, определяющих наличие сжимающих меридиональных напряжений и условия движения заготовки вниз по конусу

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. рисунок 1.23) и решение, аналогичное формуле (19) будет иметь вид:

$$\sigma_{\rho} = k \sigma_s (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{дет}}) \left(1 - \frac{1}{\rho} \right) \geq 0. \quad (2.29)$$

Решение со стороны большого торца определено формулой (2.21). Приравняв величины напряжений (2.29) и (2.21) в меридиональном направлении, получим:

$$\overline{\rho_{cp}} = \sqrt{R_{\text{дет}}} . \quad (2.30)$$

Найдем отношение $\frac{\sigma_{\rho \max}}{\sigma_s}$ по формуле (2.21) или (2.29), подставив

$$\overline{\rho_{cp}} = \sqrt{R_{\text{дет}}} .$$

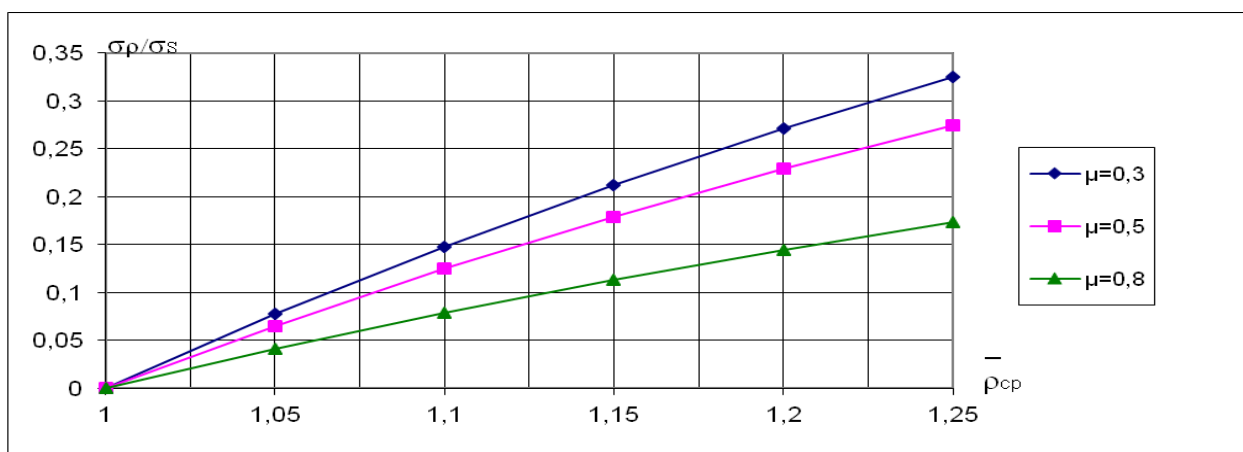


Рисунок 2.5 - Определение максимального напряжения при $f = 0,1$ и $\alpha_{\text{дет}} = 15^\circ$

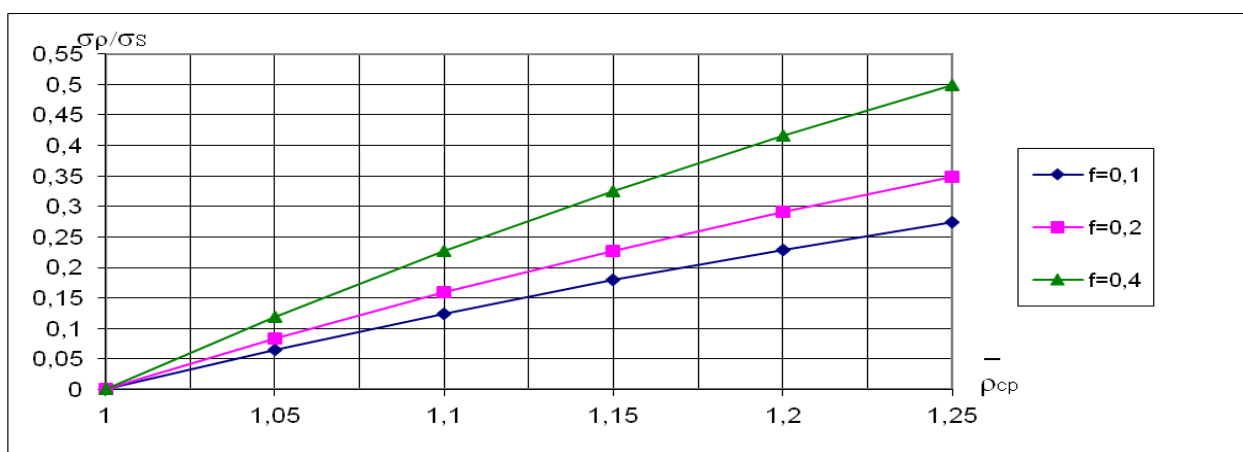


Рисунок 2.6 - Определение максимального напряжения при $\mu = 0,5$ и $\alpha_{\text{дет}} = 15^\circ$

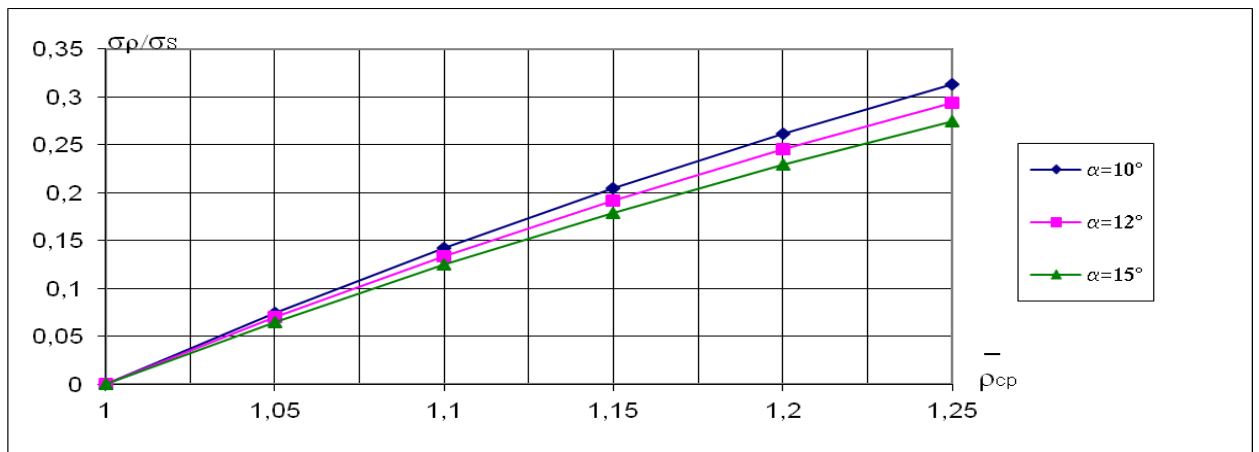


Рисунок 2.7 - Определение максимального напряжения при $\mu = 0,5$ и $f = 0,1$

На второй стадии решение уравнения равновесия сил (2.19) и условия пластичности (2.20) примет вид (2.21).

Значения соотношения напряжений, вычисленные по формуле (2.21) представлены графически (см. рисунок 2.8).

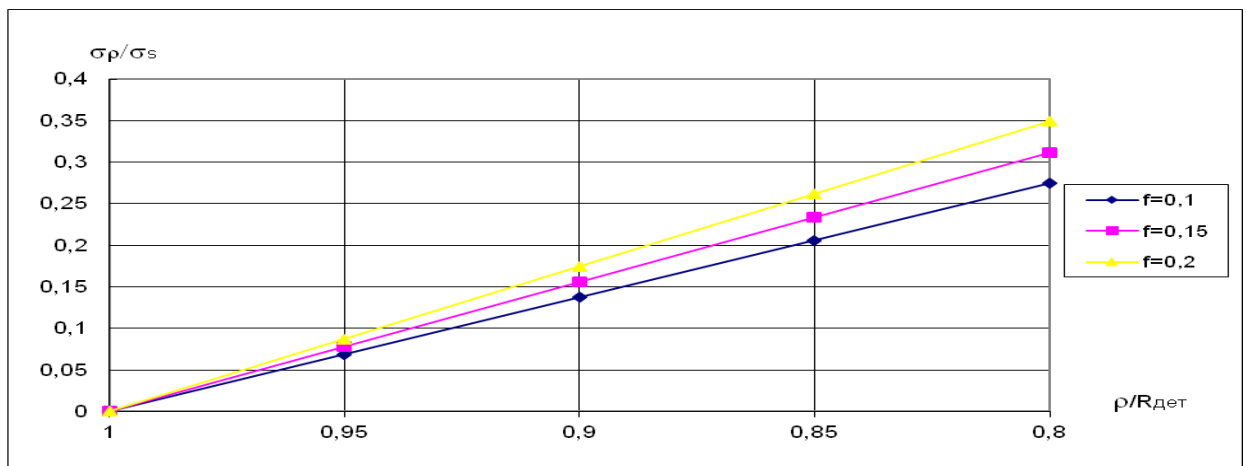


Рисунок 2.8 - Зависимость отношения напряжений σ_ρ / σ_s вдоль образующей при $\mu = 0,5$; $\alpha_{дет} = 15^\circ$ и различных значениях коэффициента трения

Приняв во внимание относительно небольшой рост напряжений σ_ρ , σ_θ на 2-ой стадии формообразования к соотношению (практически равному нулю) этих же напряжений на 1-ой стадии, которая более протяжена, примем допущение: в течении 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^{-ой} стадии близка к нулю.

С учетом сказанного на протяжении процесса выражение (2.13) примет вид:

$$b = \frac{(\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}) + 1}{1 - \mu(\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta})} = 1, \quad (2.31)$$

$$S_T = S_{заг} \left[1 - (1 - \mu) \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_{заг}} - 1 \right) \right]. \quad (2.32)$$

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 (2.18). Чтобы найти угол конусности заготовки, используем соотношение:

$$\frac{\bar{R}_{заг} - \bar{r}_{заг}}{\bar{L}_{заг}} = \cos(90^\circ - \alpha_{заг}). \quad (2.33)$$

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:

$$\bar{L}_{заг} = \bar{L}_{дет} \frac{S_{заг}}{S_{дет}}. \quad (2.34)$$

Используя предложенные формулы (2.17,2.8,2.10,2.31,2.33,2.34), построим графические зависимости.

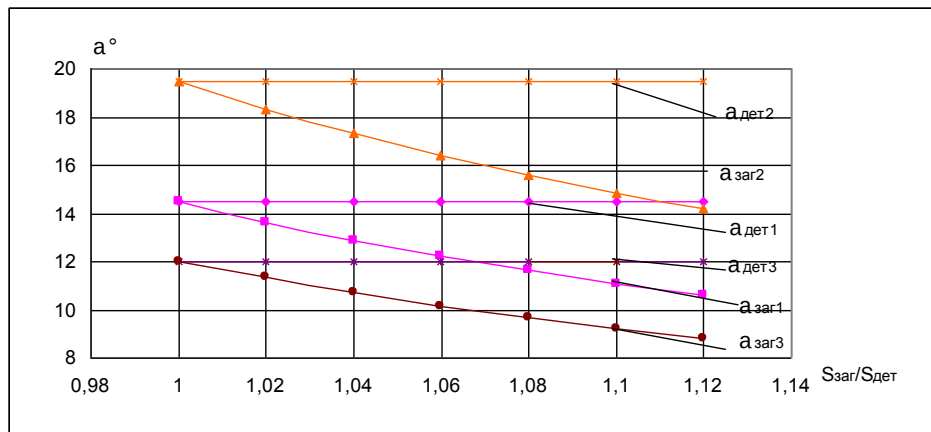


Рисунок 2.9 - Зависимость отношения $s_{zag} / s_{дет}$ от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,5$ и различных значениях угла конусности детали: $\alpha_{дет1} = 14,5^0$; $\alpha_{дет2} = 19,5^0$; $\alpha_{дет3} = 12^0$

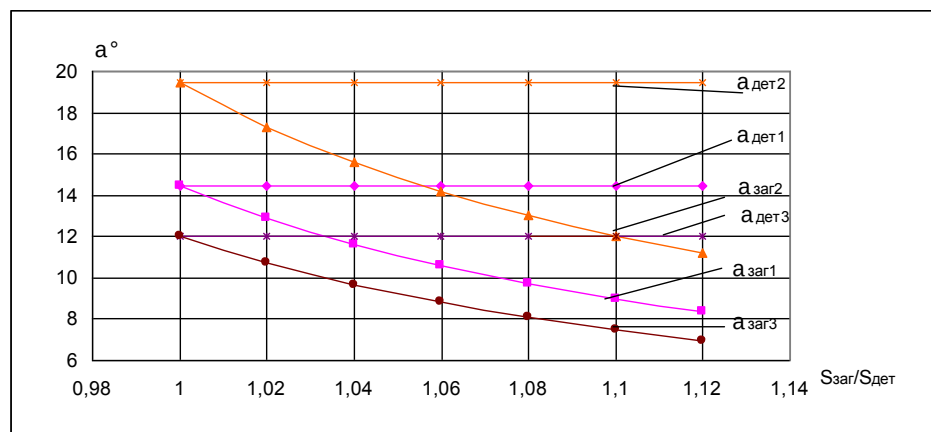


Рисунок 2.10 - Зависимость отношения $s_{zag} / s_{дет}$ от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,8$ и различных значениях угла конусности детали: $\alpha_{дет1} = 14,5^0$; $\alpha_{дет2} = 19,5^0$; $\alpha_{дет3} = 12^0$

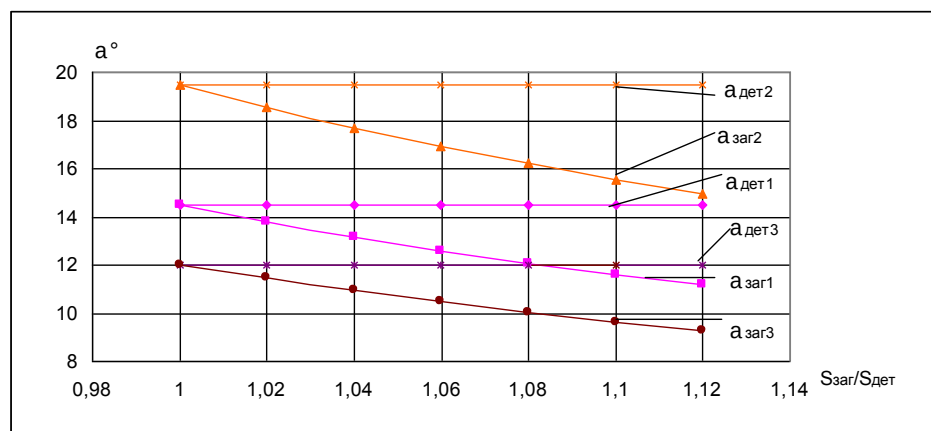


Рисунок 2.11 - Зависимость отношения $s_{zag} / s_{дет}$ от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,3$ и различных значениях угла конусности детали: $\alpha_{дет1} = 14,5^0$; $\alpha_{дет2} = 19,5^0$; $\alpha_{дет3} = 12^0$

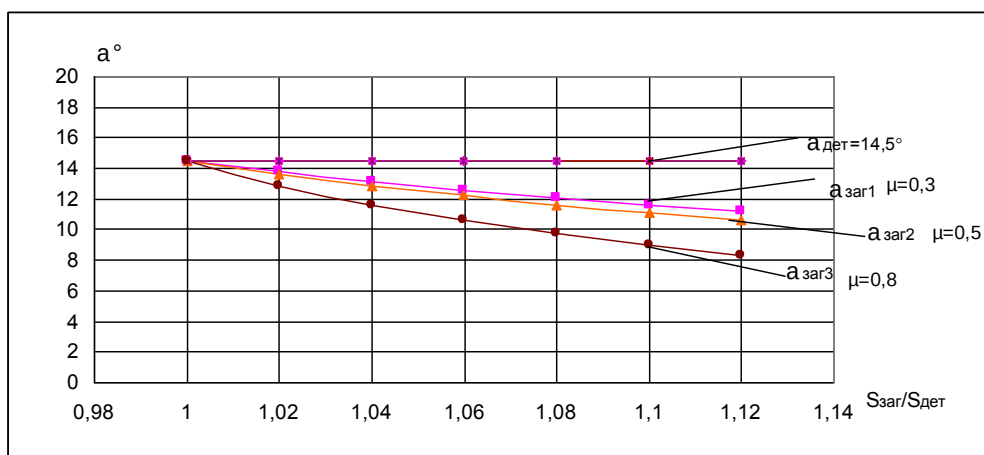


Рисунок 2.12 - Зависимость отношения S_{zag} / S_{det} от угла конусности заготовки α_{zag} при угле конусности детали $\alpha_{det1} = 14,5^0$ и различных значениях коэффициента анизотропии $\mu = 0,3$; $\mu = 0,5$; $\mu = 0,8$

По построенным графикам можно сделать вывод: независимо от коэффициента анизотропии угол конусности заготовки меньше угла конусности детали; при значениях коэффициента анизотропии $\mu \geq 0,8$ эта разница увеличивается.

Задаваясь соотношением S_{det} / S_{zag} и различными значениями коэффициента анизотропии, используя формулы (2.32,2.18,2.17,2.8) построим зависимость отношения S_T / S_{zag} .

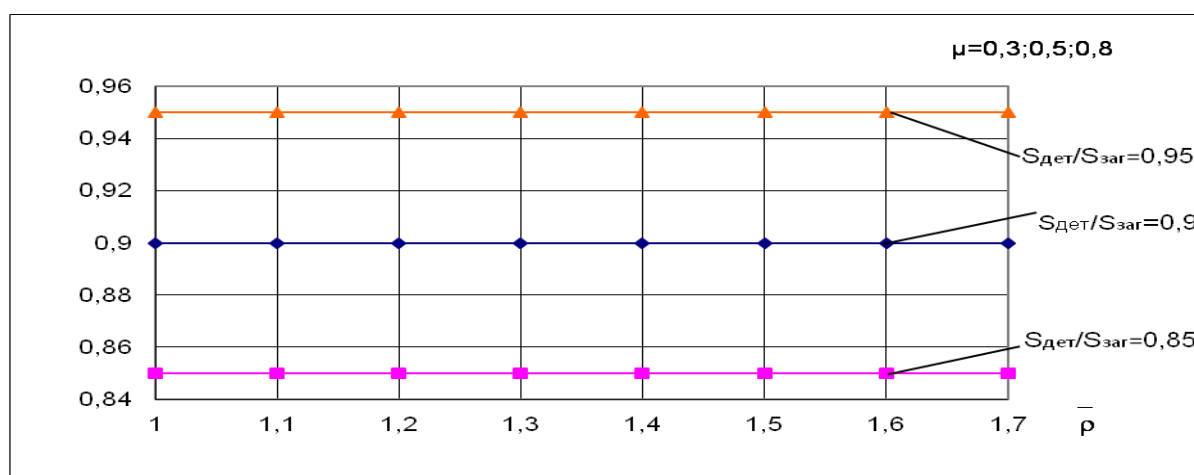


Рисунок 2.13 - Зависимость отношения S_T / S_{zag} по заданному соотношению S_{det} / S_{zag} и различных значениях коэффициента анизотропии $\mu = 0,3$; $\mu = 0,5$; $\mu = 0,8$

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.

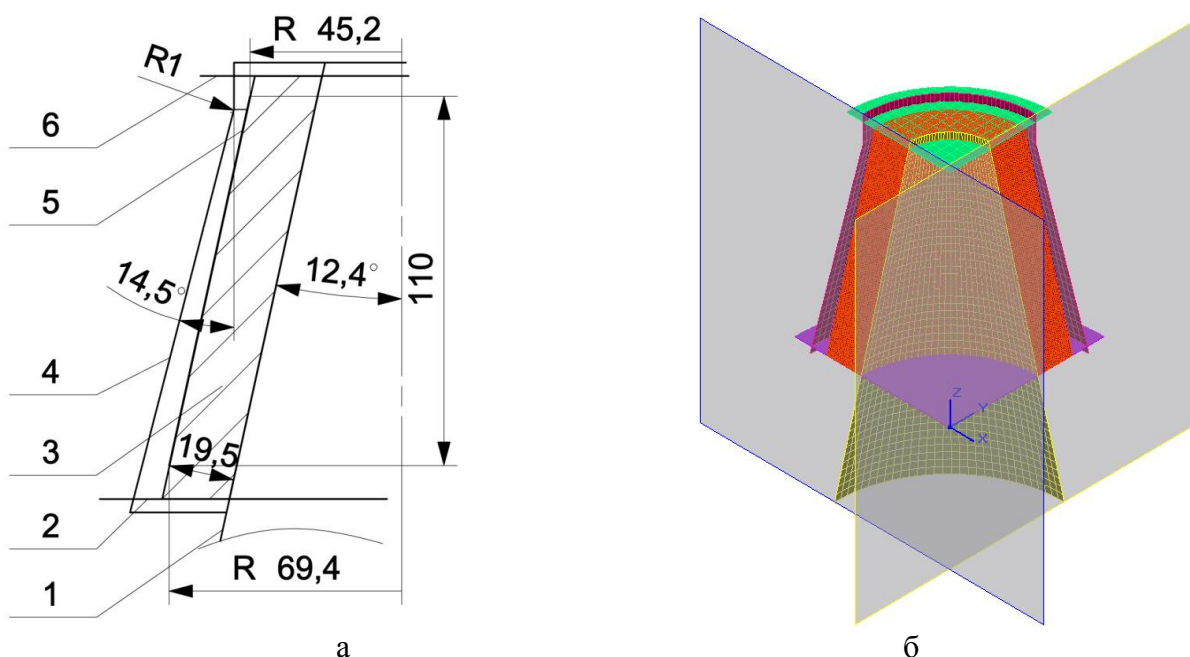
Для подтверждения достоверности теоретического анализа и сделанных выводов проведено компьютерное моделирование процесса отбортовки конической оболочки давлением эластичной среды с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе PAM-Stamp 2G (ESI Group).

В компьютерную модель процесса (рисунок 2.14) входят: эластичная среда 3, конечно-элементная сетка которой сгенерирована с использованием объемных 8-ми узловых элементов; пуансона 1, матрицы 4, нижней 2 и верхней 6 подкладок (ограничивают осевое перемещение эластичной среды), а также заготовки 5, конечно-элементные сетки которых сгенерированы с использованием оболочечных 4-х 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 моделировалось $\frac{1}{4}$ 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 убирались все степени свободы. 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.



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

Рисунок 2.14 - Физическая (а) и конечно-элементная (б) модели процесса отбортовки конической оболочки давлением эластичной среды

Материал конической заготовки толщиной 0,3 мм - коррозионно-стойкая сталь 12X18H10T: плотность 7 900 кг/м³; модуль упругости – 195 ГПа; коэффициент Пуассона - 0,3. При моделировании использовалась кривая упрочнения стали 12X18H10T, полученная при испытании на простое растяжение (рисунок 2.15). 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 1).

Таблица 1 - Механические свойства и параметры полиуретана СКУ-7Л

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

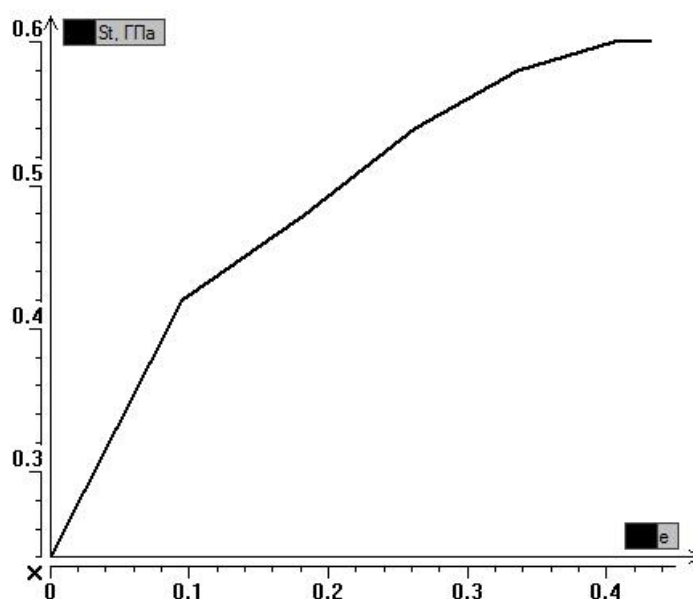


Рисунок 2.15 - Кривая упрочнения коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т

Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе формообразования с коэффициентами трения 0,23 и 0,4 приведено на рисунке 2.16. 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 трения приводит к более значительной неравномерности распределения деформаций по образующей (рисунок 2.16, б).

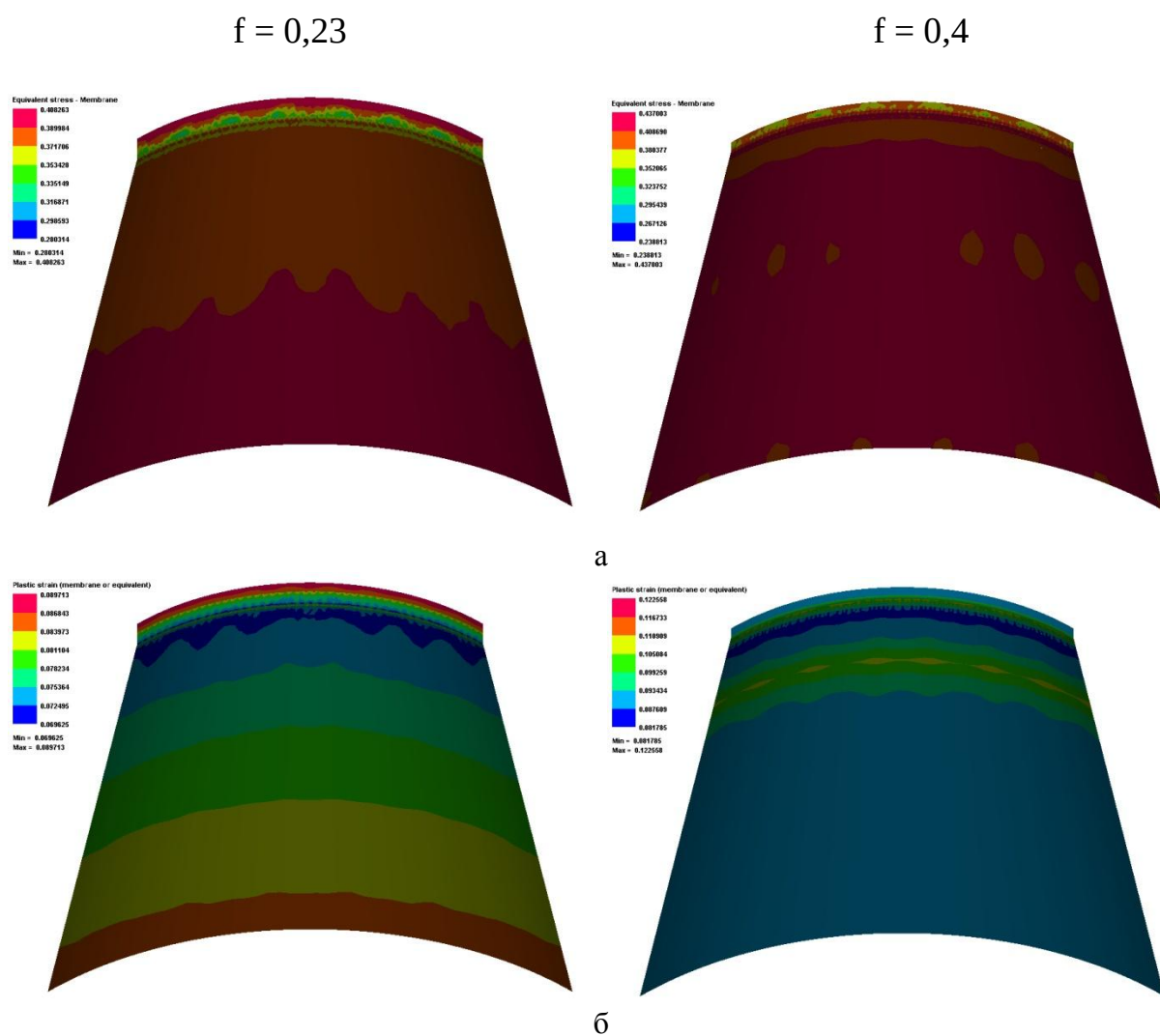


Рисунок 2.16 - Интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) при отбортовке

Как видно из рисунка 2.17 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.

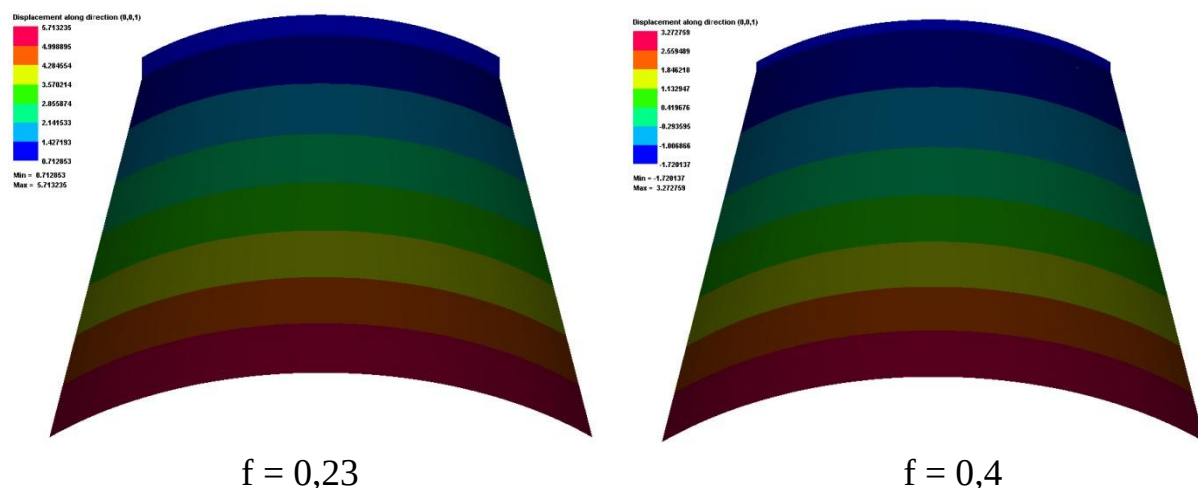


Рисунок 2.17 - Осевое перемещение узлов сетки заготовки

В процессе деформирования усилие на пуансоне линейно увеличивается и достигает максимума в конце процесса (рисунок 2.18). При этом больший коэффициент трения вызывает необходимость прикладывать большее усилие (160 кН против 136 кН).

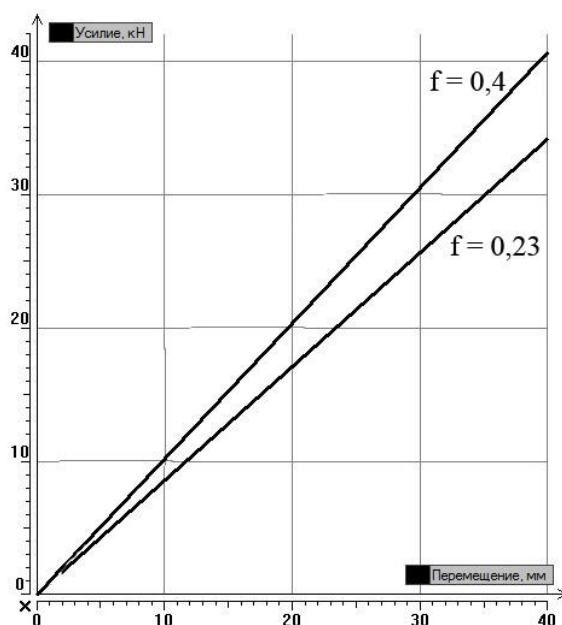


Рисунок 2.18 - Зависимость усилия от перемещения пуансона

Из рисунка 2.19 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.

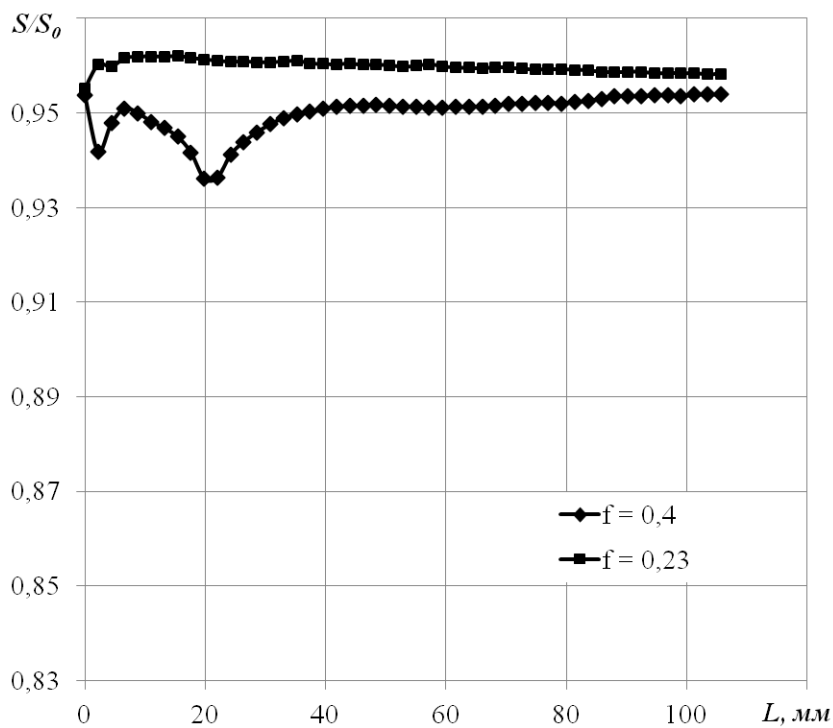


Рисунок 2.19 - Распределение относительной толщины по образующей конической оболочки в зависимости от величины коэффициента трения

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.

2.1.2 Исследование способа формообразования деталей из кольцевой заготовки

Для реализации этого способа необходимо установить границы перехода процесса формовки в отбортовку и наоборот. Процесс формовки реализуется 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 (2.3) для рассматриваемого случая формообразования заготовки при $f = 0$ и $R_\rho \rightarrow \infty$ примет вид:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0. \quad (2.35)$$

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

С учетом граничных условий $\sigma_\rho = 0$; $\rho = r_{кр}$ получим напряжение при отбортовке [84]:

$$\sigma_\rho^{отб} = \sigma_s \left(1 - \frac{r_{кр}}{R_\phi} \right), \quad (2.36)$$

где $s_{заг}$ - толщина заготовки;

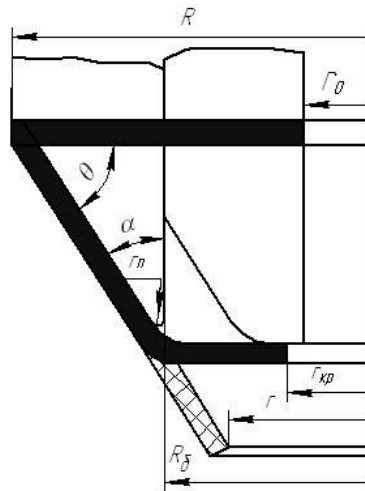
σ_s - напряжение текучести;

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

$r_{кр}$ - радиус кромки.

В выражении (2.36) 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_ϕ геометрических параметров заготовки после формовки, угол θ охвата заготовкой радиуса пуансона при заданном соотношении r / R геометрических параметров детали (см. рисунок 2.20).



R - радиус большего основания детали; r - радиус меньшего основания детали, полученной формовкой; R_0 - радиус цилиндрической поверхности на границе наружного и внутреннего пуансонов; r_{kp} - радиус кромки; r_n - радиус закругления пуансона; r_0 - радиус отверстия в заготовке; θ - угол охвата заготовкой радиуса пуансона; α - угол конусности

Рисунок 2.20 - Схема процесса формовки и отбортовки

Для решения поставленной задачи необходимо выполнение следующих условий:

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

2. На 2-ой стадии процесса, т.е. при отбортовке, предельные условия деформирования определяются выражением [84]:

$$e_{\theta_{kp}} = \frac{r - r_0}{r_0} \leq \delta_p, \quad (2.37)$$

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

δ_p - равномерное удлинение.

Из последнего выражения находим радиус отверстия:

$$r_0 = \frac{r}{\delta_p + 1}. \quad (2.38)$$

В формуле (2.36) будем считать: $\sigma_s = \sigma_{To} + P e_\theta$,

$$r_{kp} = (1 + \varepsilon) r_0, \quad (2.39)$$

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

e_i - интенсивность деформаций, равная максимальной тангенциальной деформации;

Π - модуль упрочнения, равный:

$$\Pi = \frac{\sigma_{To}}{1 - \delta_p}; \quad (2.40)$$

σ_{To} - экстраполированный предел текучести.

С учетом формул (2.40, 2.39) из выражения (2.36) получим:

$$\sigma_{\rho}^{отб} = \sigma_{To} \left(1 + \frac{\varepsilon}{1 - \delta_p} \right) \left(1 - \frac{r_{кр}}{R_{\theta}} \right), \quad (2.41)$$

Когда выполняется условие $\sigma_{\rho}^{отб} = \overline{\sigma}_{\rho}^{форм}$ (где $\overline{\sigma}_{\rho}^{форм}$ - 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:

$$\sigma_{\rho}^{форм} = \sigma_{To} + \Pi \left(\frac{S_{заг} - S_{дет}}{S_{заг}} \right), \quad (2.42)$$

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

$S_{заг}$ - толщина заготовки.

С учетом изгиба и трения формула (2.42) примет вид:

$$\overline{\sigma}_{\rho}^{форм} = \left\{ \left[\sigma_{To} + \Pi \left(\frac{S_{заг} - S_{дет}}{S_{заг}} \right) \right] - \frac{\sigma_{To} + \Pi \left(\frac{S_{заг} - S_{дет}}{S_{заг}} \right)}{\frac{2r_n}{S_{заг}} + 1} \right\} / (1 + f \cdot \theta). \quad (2.43)$$

Отношение $S_{дет} / S_{заг}$ 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:

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

$$\frac{S_{\text{дет}}}{S_{\text{заг}}} = 1 - 0,5\delta_{\rho}. \quad (2.44)$$

Тогда формулу (2.42) запишем в следующем виде:

$$\sigma_{\rho}^{\text{отб}} = \sigma_{\rho}^{\text{форм}} = \sigma_{T_0} + 0,5\Pi\delta_{\rho} = \sigma_{T_0} + 0,5\delta_{\rho} \frac{\sigma_{T_0}}{1 - \delta_{\rho}}. \quad (2.45)$$

Приравняв выражения (2.41) и (2.43) с учетом формул (2.44), после преобразования получим:

$$\frac{r_0}{R_{\phi}} = \frac{1}{1 + \varepsilon} - \frac{2(1 - 0,5\delta_{\rho}) \frac{r_n}{S_{\text{заг}}}}{\left(\frac{2r_n}{S_{\text{заг}}} + 1 \right) (1 + \varepsilon)(1 + f \cdot \theta)(1 + \varepsilon - \delta_{\rho})}. \quad (2.46)$$

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

$$V_{\text{дет}} = V_{\text{заг}},$$

$$F_{\text{дет}} S_{\text{заг}} = F_{\text{заг}} S_{\text{заг}}, \quad (2.47)$$

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

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

Запишем равенство (2.47) с учетом обозначений (см. рисунок 2.20):

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

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

С учетом отношений (2.38) и (2.44) находим:

$$\cos \theta = \frac{\frac{(1 - 0,5\delta_p)}{2} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]}{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \frac{1}{(1 + \delta_p)^2}}. \quad (2.48)$$

Определив по формулам (2.48), (2.41) значения θ и $\sigma_p^{омб}$ при заданных геометрических значениях детали r/R и механических свойств материала δ_p , получим условие последовательного максимально-возможного деформирования заготовки по схеме формовка-отбортовка для изготовления конической оболочки. Оно определяется геометрическим соотношением r_0/R_0 и позволяет установить высоту конической детали.

На рисунке 2.21 в качестве примера приведены результаты расчета для материала: сталь 12Х18Н10Т.

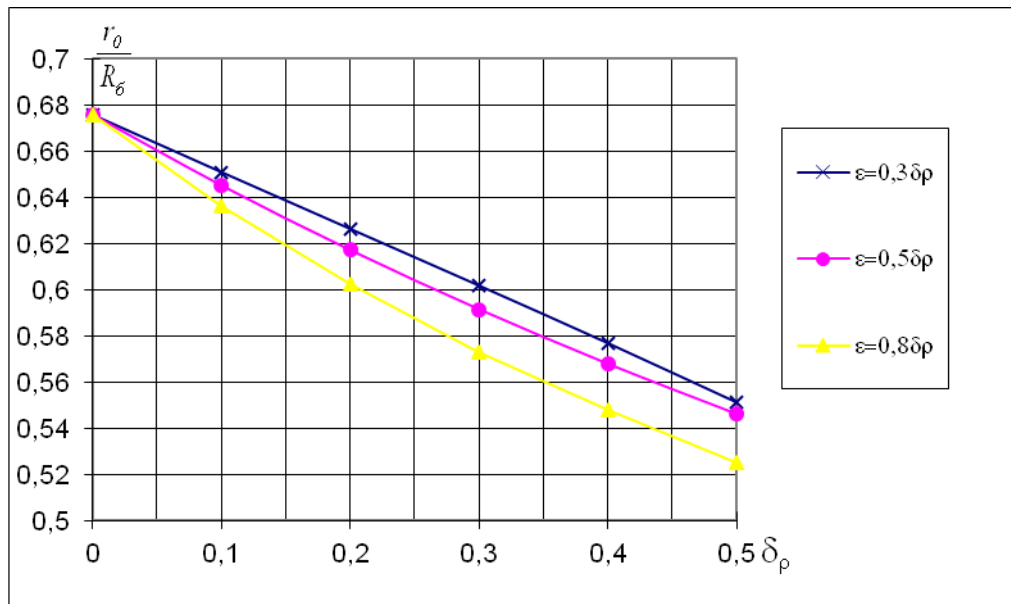


Рисунок 2.21 - Зависимость отношения r_0/R_0 от δ_p при $r/R=0,3$; $r_n/S_{заг}=0,3$; коэффициент трения $f=0,15$

Для интенсификации процесса и получения глубоких конических деталей следует уменьшить соотношение r_0/R_0 и увеличить угол θ . Однако,

основным ограничением является показатель пластических свойств материала δ_p . Анализ формул (2.48), (2.41) показывает, что с увеличением δ_p увеличивается угол θ и уменьшается отношение r_0 / R_σ . Это позволяет получить более высокие конические детали.

2.1.3 Исследование способа формообразования деталей из цилиндрической заготовки

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

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3) = 0. \quad (2.49)$$

Решение (2.49) имеет вид при $\sigma_\theta \cong \sigma_s^* = \sqrt{2} \sqrt{1 - \mu}$ (2.20) и граничном условии при $\rho = r$, $\sigma_\rho = 0$:

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_s^*} = (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3) \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}} \right), \quad (2.50)$$

где $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r}$.

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

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta (1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3) = 0. \quad (2.51)$$

Решение (2.51) имеет вид при граничном условии $\rho = R_{\text{дем}}$, $\sigma_\rho = 0$:

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_s^*} = (1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3) \left(1 - \frac{\bar{R}_{\text{дем}}}{\bar{\rho}} \right), \text{ где } \bar{R}_{\text{дем}} = \frac{R_{\text{дем}}}{r_{\text{дем}}}. \quad (2.52)$$

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

Приравняв (2.50) и (2.52) получим:

$$(1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3) \left(1 - \frac{R_{\partial em}}{\rho_n} \right) = (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3) \left(1 - \frac{r_{\partial em}}{\rho_n} \right). \quad (2.53)$$

Отсюда:

$$\bar{\rho}_n = \frac{1 - \bar{R}_{\partial em} + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3 (1 + \bar{R}_{\partial em})}{2 f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3}. \quad (2.54)$$

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

$$\frac{\bar{\sigma}_\rho}{\sigma_s^*} = \frac{1 + f \operatorname{ctg} \alpha_3}{\bar{\rho}_n - 1} (\bar{\rho}_n - 1 - \ln \bar{\rho}_n). \quad (2.55)$$

Используя формулу (2.54) при исходных данных $f=0,3$; $\alpha_3 = 15^\circ$; $\bar{R}_{\partial em}=1,3$ и рассчитав отношение напряжений по формуле (2.55), получили 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:

$$1 - \frac{S_T}{S_{заг}} = (1 - \mu) \frac{1 + \frac{\bar{\sigma}_\rho}{\sigma_s^*}}{1 - \mu \frac{\bar{\sigma}_\rho}{\sigma_s^*}} \left(1 - \frac{1 - \bar{\Delta}}{\bar{\rho}} \right), \quad (2.56)$$

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

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

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

Так как $\sigma_\rho = 0$, то (2.56) примет вид:

$$S_T = S_{заг} \left[1 - (1 - \mu) \left(1 - \frac{1 - \bar{\Delta}}{\bar{\rho}} \right) \right]. \quad (2.57)$$

Условие минимизации разнотолщинности для конуса примет вид:

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

С учетом (2.57), получим:

$$\int_R^1 \left[\bar{S}_{дет} - 1 + (1 - \mu) \left(1 - \frac{1 - \bar{\Delta}}{\bar{\rho}} \right) \right]^2 d\bar{\rho} \rightarrow \min, \quad (2.58)$$

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

Если минимизировать уравнение (2.58) по относительной толщине детали, то получим наименьшую разнотолщинность по относительной толщине детали и наименьшее отклонение относительной толщины детали от толщины заготовки:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{S}_{дет}} = 0; \quad (\bar{S}_{детн} - 1)(1 - \bar{R}_{дет} + \ln \bar{R}_{дет}) + (1 - \mu)[1 - \bar{R}_{дет} + \ln \bar{R}_{дет}(1 - \bar{\Delta})] = 0. \quad (2.59)$$

Отсюда находим:

$$\bar{S}_{детн} = 1 - \frac{(1 - \mu)[1 - \bar{R}_{дет} + \ln \bar{R}_{дет}(1 - \bar{\Delta})]}{1 - \bar{R}_{дет}}. \quad (2.60)$$

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

$$\bar{S}_{детн} - \bar{S}_{детм} = \xi, \quad (2.61)$$

где $\bar{S}_{детн}, \bar{S}_{детм}$ - значения относительных толщин, рассчитанной по формуле (2.60) и минимальной на кромке, рассчитанной по формуле (2.57) при $\bar{\rho} = \bar{R}_{дет}$;

ξ - относительное утонение заготовки.

Подставив (2.57), (2.60) в формулу (2.61) после преобразований, имеем:

$$\bar{R}_{дет} = - \frac{0,5 + 1,5\bar{\Delta} - \frac{\xi}{1 - \mu}}{1 - \bar{\Delta}} + \sqrt{\left[\frac{0,5 + 1,5\bar{\Delta} - \xi / (1 - \mu)}{1 - \bar{\Delta}} \right]^2 + \frac{2}{1 - \bar{\Delta}}}. \quad (2.62)$$

По формуле (2.60) найдем наименьшую толщину детали и рассчитаем по (2.57) отношение толщин $S_T / S_{заг}$.

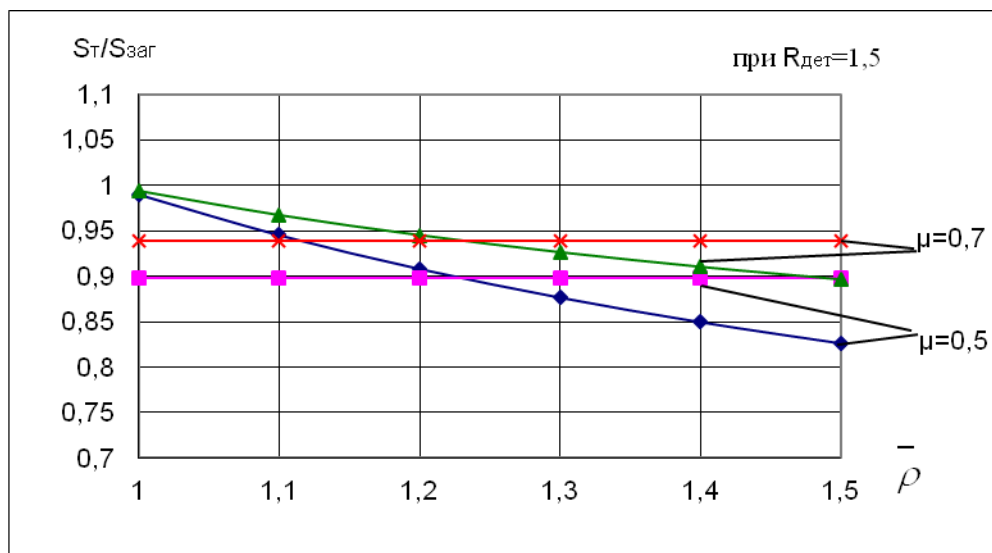


Рисунок 2.22 - Изменение $s_T / s_{заг}$ при увеличении отношения $\bar{\rho}$ для конической детали

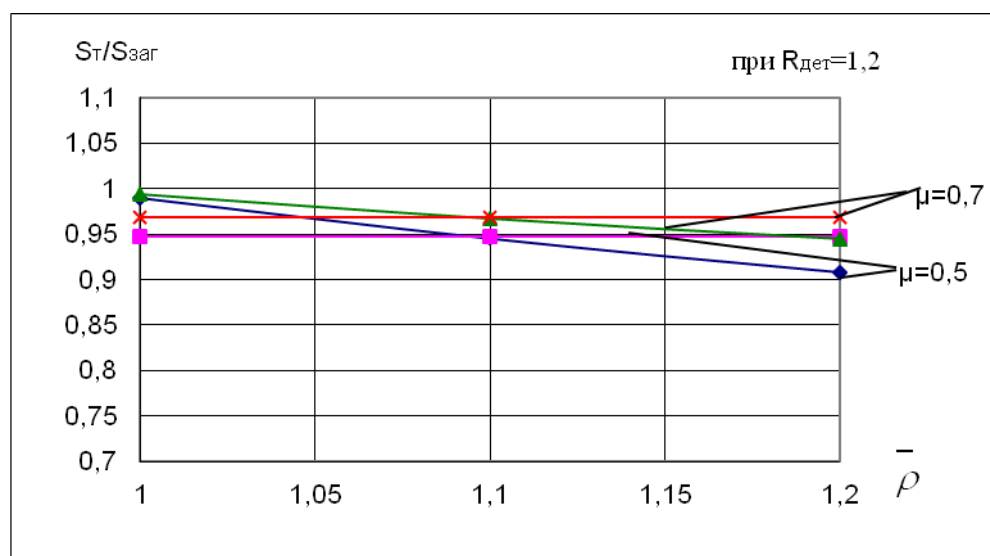


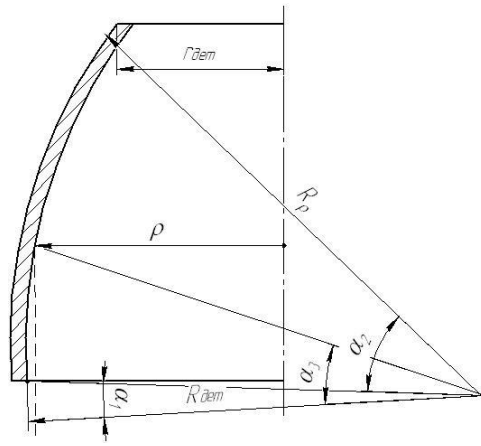
Рисунок 2.23 - Изменение $s_T / s_{заг}$ при увеличении отношения $\bar{\rho}$ для конической детали

Рассмотрим выпуклую деталь:

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

Радиус меняется:

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



R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении; α_1, α_2 - угол, образованный 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

Рисунок 2.24 - Схема формообразования выпуклой детали

Ставим пределы интегрирования в уравнение (2.58):

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[\bar{S}_{det} - 1 + (1 - \mu) \left(1 - \frac{1 - \bar{\Delta}}{R_\rho \cos \alpha_3 - a} \right) \right]^2 d\alpha_3 \rightarrow \min. \quad (2.63)$$

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

$$(\bar{S}_{det_n} - 1)(\alpha_2 - \alpha_1) + (1 - \mu) \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \alpha_i (1 - \bar{\Delta})}{R_\rho \cos \alpha_i - a} \right) = 0. \quad (2.64)$$

$$\bar{S}_{det_n} = 1 - \frac{(1 - \mu) \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \alpha_i (1 - \bar{\Delta})}{R_\rho \cos \alpha_i - a} \right)}{\alpha_2 - \alpha_1}, \quad (2.65)$$

где n - число участков очага деформации;

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

По формуле (2.65) найдем наименьшую толщину детали и рассчитаем по (2.57) отношение толщин $S_T / S_{заг}$.

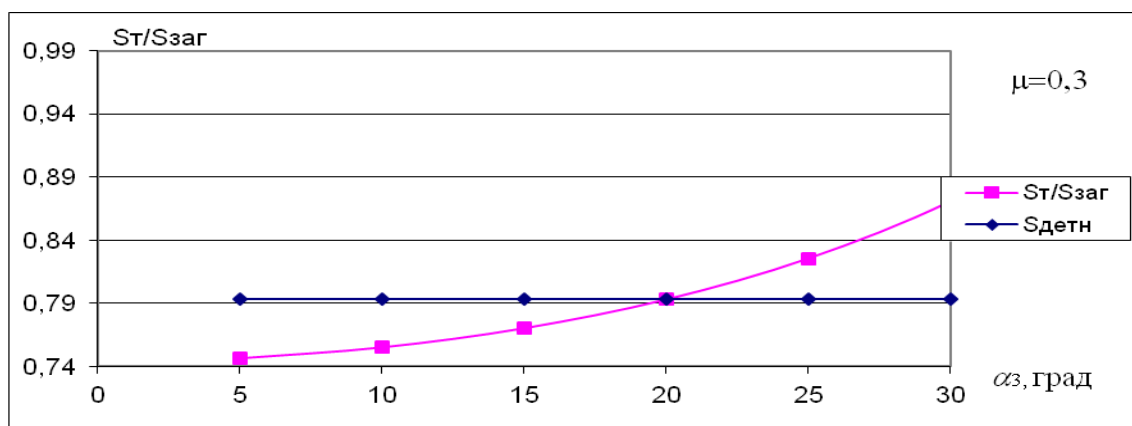


Рисунок 2.25 - Изменение s_T / s_{agr} при увеличении угла α_3 , $\bar{s}_{детн} = 0,793$ и геометрических параметрах детали $R_\rho = 2,5; \alpha_1 = 5^\circ; \alpha_2 = 35^\circ; \bar{\Delta} = 0,05; \mu = 0,3$

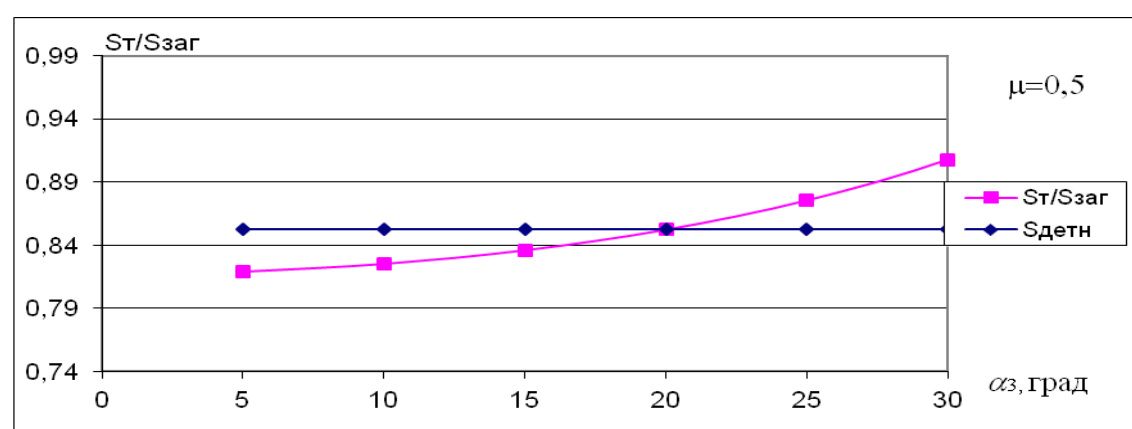


Рисунок 2.26 - Изменение s_T / s_{agr} при увеличении угла α_3 , $\bar{s}_{детн} = 0,852$ и геометрических параметрах детали $R_\rho = 2,5; \alpha_1 = 5^\circ; \alpha_2 = 35^\circ; \bar{\Delta} = 0,05; \mu = 0,5$

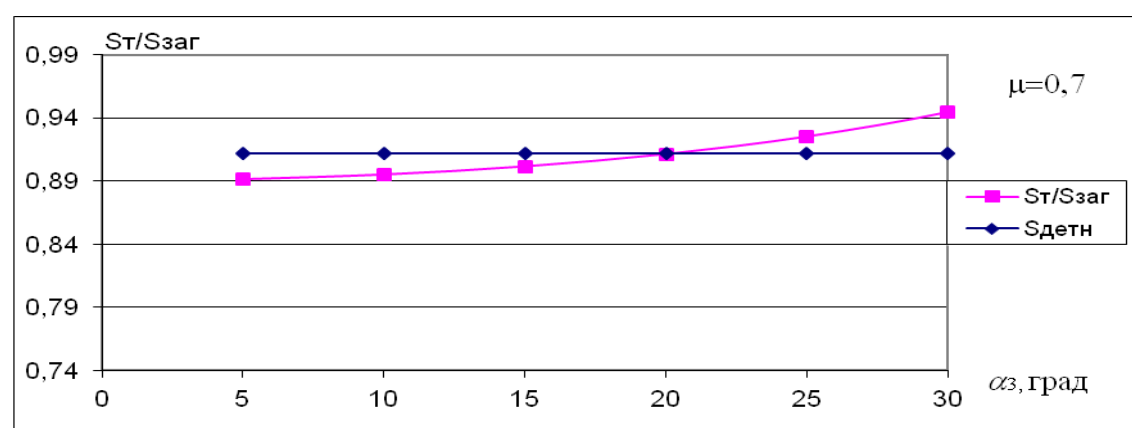


Рисунок 2.27 - Изменение s_T / s_{agr} при увеличении угла α_3 , $\bar{s}_{детн} = 0,911$ и геометрических параметрах детали $R_\rho = 2,5; \alpha_1 = 5^\circ; \alpha_2 = 35^\circ; \bar{\Delta} = 0,05; \mu = 0,7$

Рассмотрим вогнутую деталь.

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:

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

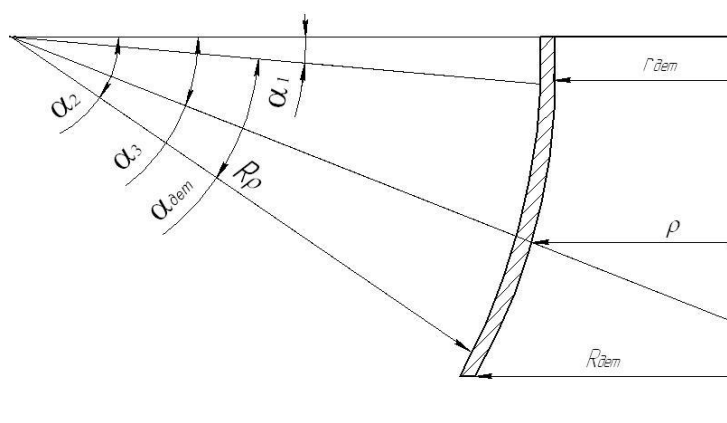


Рисунок 2.28 - Схема формообразования вогнутой детали

После интегрирования:

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

Отсюда:

$$\bar{S}_{детн} = 1 - \frac{(1 - \mu) \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \alpha_i (1 - \bar{\Delta})}{R_\rho (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_i) + 1} \right)}{\alpha_2 - \alpha_1} . \quad (2.66)$$

По формуле (2.66) найдем наименьшую толщину детали и рассчитаем по (2.57) отношение толщин $S_T / S_{заг}$.

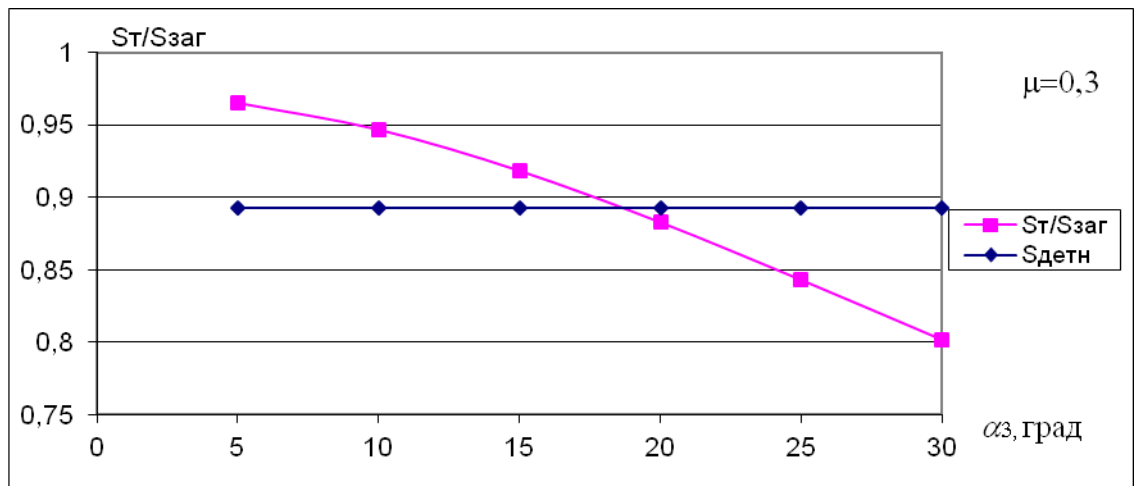


Рисунок 2.29 - Изменение s_T / s_{agr} при увеличении угла α_3 , $\bar{s}_{детн}=0,893$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^\circ; \alpha_2=35^\circ; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,3$

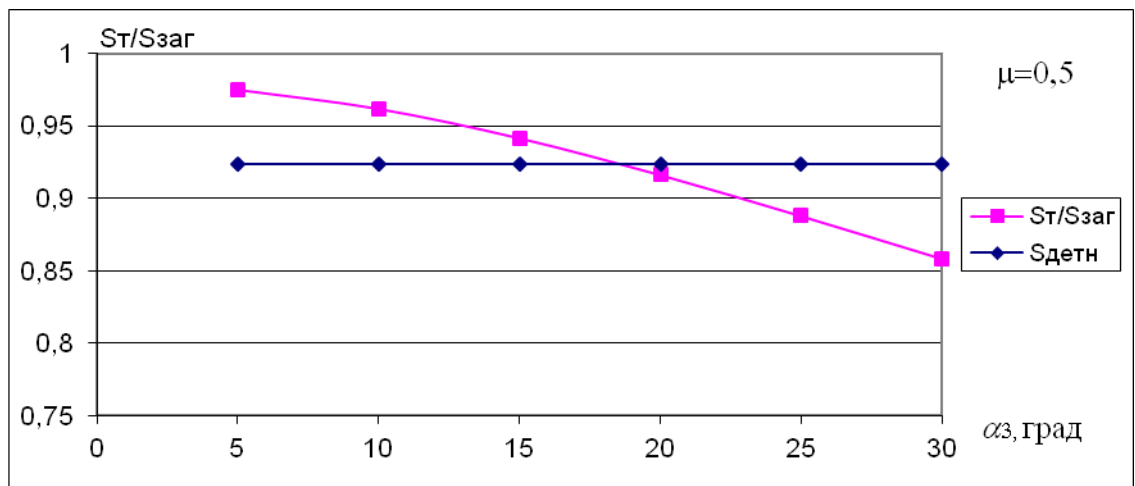


Рисунок 2.30 - Изменение s_T / s_{agr} при увеличении угла α_3 , $\bar{s}_{детн}=0,923$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^\circ; \alpha_2=35^\circ; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,5$

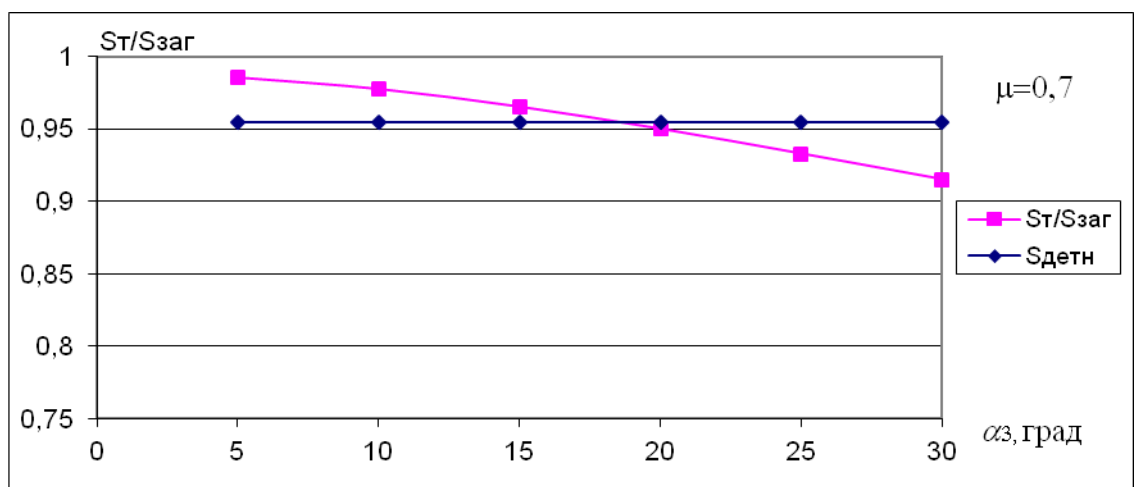


Рисунок 2.31 - Изменение s_T / s_{agr} при увеличении угла α_3 , $\bar{s}_{детн}=0,954$ и геометрических параметрах детали $R_\rho=2,5; \alpha_1=5^\circ; \alpha_2=35^\circ; \bar{\Delta}=0,05; \mu=0,7$

2.1.4 Исследование способа формообразования деталей бочкообразной формы

Для создания условий, обеспечивающих возможность получения детали с минимальной разнотолщинностью, необходимо выполнить компоновку (см. рисунок 1.26) 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, размерами детали и закрытой высотой 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 они не должны превышать 25% степени деформации,

Согласно геометрии запишем:

$$\frac{V_{1,1}}{2} = \frac{\pi D^2}{16} \cdot \left(\frac{H_{заг}}{2} - h_{\epsilon} \right) - \frac{\pi}{16} \frac{\left(\frac{H_{заг}}{2} - h_{\epsilon} \right)}{\cos \alpha} \left[d_0 - \left(\frac{H_{заг}}{4} + \frac{h_{\epsilon}}{2} \right) \right]^2 , \quad (2.67)$$

где H_{3az} - высота заготовки;

D_{3az} - 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 :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\frac{\pi D_{3az}^2}{16} \left(\frac{H_{3az}}{4} - \frac{h_6}{2} \right) - \frac{V_2}{2}}{\frac{\pi}{16} \frac{\left(\frac{H_{3az}}{2} - h_6 \right)}{\cos \alpha}} + \frac{H_{3az}}{4} + \frac{h_6}{2}}. \quad (2.68)$$

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

$$\frac{V_{1,2}}{2} = \frac{\pi D_{3az}^2}{16} \cdot \left(\frac{H_{3az}}{2} - h_n \right) - \frac{\pi}{16} \frac{\left(\frac{H_{3az}}{2} - h_n \right)}{\cos \alpha} \left[d_0 + \frac{H_{3az}}{4} \operatorname{tg} \alpha \right]^2, \quad (2.69)$$

$$h_n = \frac{H_{3az}}{2} - \frac{8V_2}{\pi \left(D_{3az}^2 - \frac{1}{\cos \alpha} \left[d_0 + \frac{H_{3az}}{4} \operatorname{tg} \alpha \right]^2 \right)}. \quad (2.70)$$

Определим объем v_2 из геометрии получаемой детали:

$$\frac{V_2}{2} = \pi R_\rho^3 \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha_2 \right) - 2\pi R_\rho^2 a \sin \alpha_2 + \pi R_\rho a^2 \alpha_2 - \frac{\pi D_{3az}^2}{8} H_{3az}, \quad (2.71)$$

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 детали бочкообразной формы в случае отсутствия трения (или очень малых

значениях коэффициентов трения) воспользуемся формулами (2.57, 2.65, 2.66).

Для вогнутой детали учтем:

$$\bar{R}_\rho = \frac{\bar{R}_{\text{дет}} - 1}{1 - \cos \alpha_2}. \quad (2.72)$$

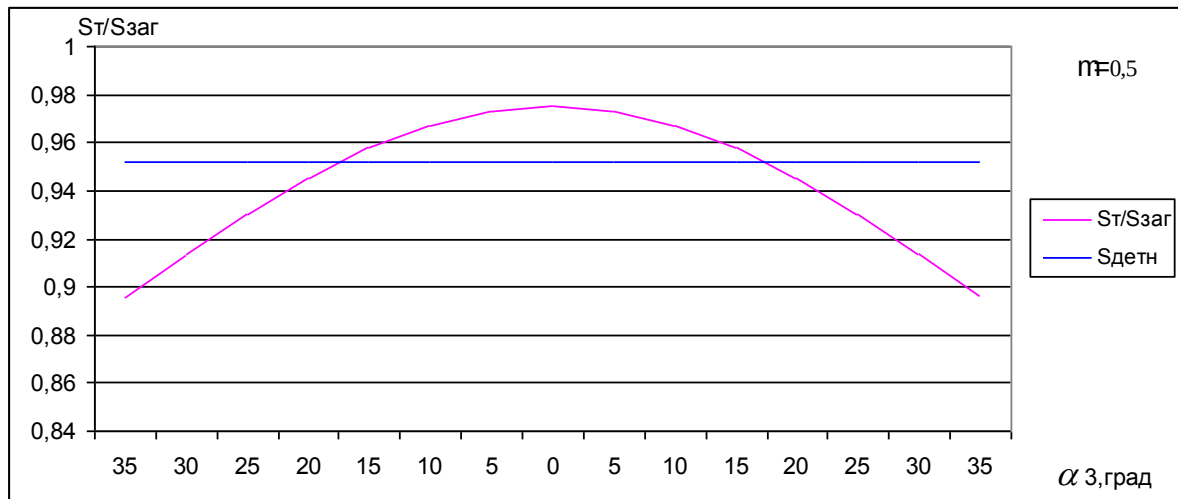


Рисунок 2.32 - Изменение s_T / s_{zag} при увеличении угла α_3 , $\bar{s}_{\text{детн}} = 0,952$ и геометрических параметрах вогнутой детали $\bar{R}_{\text{дет}} = 1,2$; $\alpha_1 = 0^\circ$; $\alpha_2 = 35^\circ$; $\bar{\Delta} = 0,05$; $\mu = 0,5$; $R_\rho = 1,1$

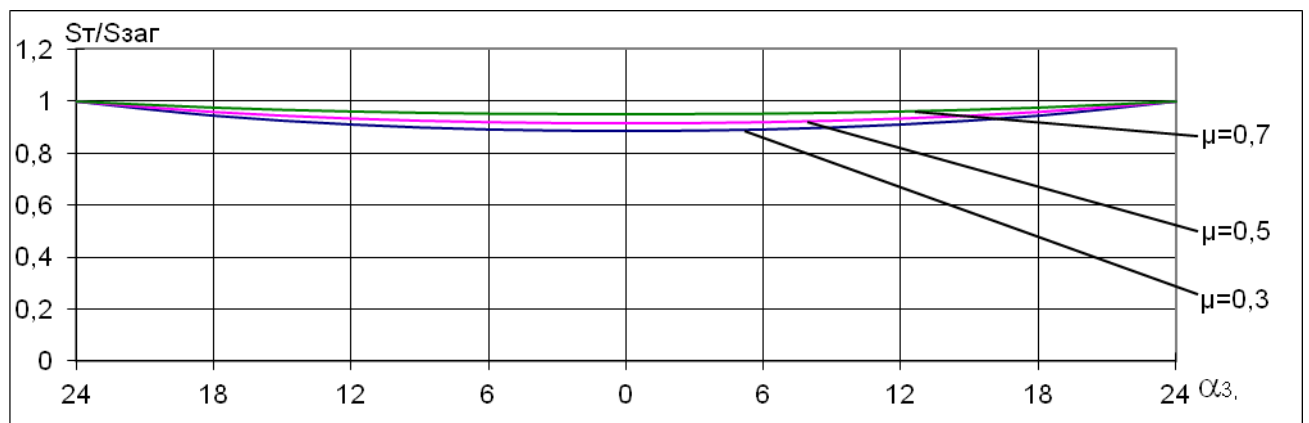


Рисунок 2.33 - Изменение s_T / s_{zag} при увеличении угла α_3 и геометрических параметрах выпуклой детали $R_\rho = 2,3$; $\bar{R}_{\text{дет}} = 1,2$; $\bar{\Delta} = 0$; $\alpha_2 = 24^\circ$

В дальнейшем рассмотрим случай, когда возникает трения и влияние его значимо.


$$r = R_o \cos \alpha_2 - a, \quad (2.73)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{1 + a}{R_{\text{dem}} + a}, \quad (2.74)$$

Найдем напряжения в центре заготовки при $\alpha_1 = 0$. Будем считать, что трение на заготовке направленно в сторону торцев, так как заготовка при формообразовании укорачивается интенсивнее, чем возможное укорочение эластичного элемента, из-за трения его по раздвижным секторам. С учетом сказанного, уравнение равновесия примет вид (для половины высоты детали):

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{f\rho}{\sin \alpha_3} \left(\pm \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (2.75)$$

– - ВОГНУТАЯ ДЕТАЛЬ.

Используем условие пластичности (2.20). Уравнение равновесия сил примет

вид при $R_\theta = \frac{\rho}{\cos \alpha_3}$:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left(1 \mp \frac{f\rho}{R_\rho \sin \alpha_3} \right) - \sigma_s^* (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_3) = 0, \quad (2.76)$$

где σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении;

f - контактное трение заготовки, коэффициент трения;

α_3 - угол наклона касательной, проведенной к элементу с координатой радиусом ρ и осью симметрии детали;

+ - вогнутая деталь;

- - выпуклая деталь.

Запишем последнее выражение в виде:

$$\frac{d\sigma_\rho}{\sigma_\rho \left(1 \mp \frac{f\rho}{R_\rho \sin \alpha_3} \right) - \sigma_s^* (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_3)} = - \frac{d\rho}{\rho}. \quad (2.77)$$

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:

$$\alpha_{3c} = \alpha_2 / 2. \quad (2.78)$$

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

$$C = \ln |r| + \ln \left[- \sigma_s^* (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{3c}) \right]^{1 \mp \frac{f \cdot \rho_c}{R_\rho \sin \alpha_{3c}}}. \quad (2.79)$$

Обозначим:

$$1 \mp \frac{f \cdot \rho_c}{R_\rho \sin \alpha_{3c}} = m = \operatorname{const}, \quad (2.80)$$

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

После преобразований решение примет вид:

$$\sigma_{\rho} = \frac{1}{m} \sigma_s^* (1 + \text{fctg } \alpha_{3c}) \left(1 - \left(\frac{r}{\rho} \right)^m \right). \quad (2.81)$$

Запишем уравнение связи:

$$\left(1 - \frac{S_T}{S_{3az}} \right) = (1 - \mu) \frac{1 + \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}}{1 - \mu \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}} \left(1 - \frac{r}{\rho} \right) \text{ или} \quad (2.82)$$

$$S_T = S_{3az} \left[1 - (1 - \mu) \frac{1 + \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}}{1 - \mu \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}} \left(1 - \frac{r}{\rho} \right) \right]. \quad (2.83)$$

Разложим отношение $\frac{1 + \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}}{1 - \mu \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}}$ в ряд Тейлора при $\frac{r}{\rho} = 1$:

$$\frac{1 + \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}}{1 - \mu \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}} = 1 + (1 + \text{fctg } \alpha_{3c})(1 - \mu) \left[1 - \frac{r}{\rho} \right]. \quad (2.84)$$

С учетом выражения (2.83) запишем уравнение (2.2):

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

$$\int_0^{\alpha_2} \left[\bar{S}_{\partial em} - 1 + (1 - \mu) + \left[1 + (1 + \text{fctg } \alpha_{3c})(1 - \mu) \left(1 - \frac{1}{\rho} \right) \right] \left(1 - \frac{1}{\rho} \right) \right] d\alpha_{3c} \rightarrow \min,$$

где $\bar{S}_{\partial em} = \frac{S_{\partial em}}{S_{3az}}, \quad \bar{\rho} = \frac{1}{\rho}.$

Варьируем выражение по толщине заготовки:

$$\int_R^1 \left[\bar{S}_{\partial em} - 1 + (1 - \mu) \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}} \right) - (1 - \mu)^2 (1 + \text{fctg } \alpha_{3c}) \left(\frac{1}{\bar{\rho}} - 1 \right)^2 \right] d\bar{\rho} = 0. \quad (2.85)$$

Отсюда находим:

$$\bar{S}_{\partial em \text{ и}} = 1 - \frac{(1 - \mu) \left(1 - \bar{R}_{\partial em} + \ln \bar{R}_{\partial em} \right) + (1 - \mu)^2 \left(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{3c} \right) \left(2 \ln \bar{R}_{\partial em} - \bar{R}_{\partial em} + \frac{1}{\bar{R}_{\partial em}} \right)}{1 - \bar{R}_{\partial em}} \quad (2.86)$$

Используя формулы (2.81, 2.84, 2.83) рассчитаем отношение толщин $S_T / S_{заг}$.

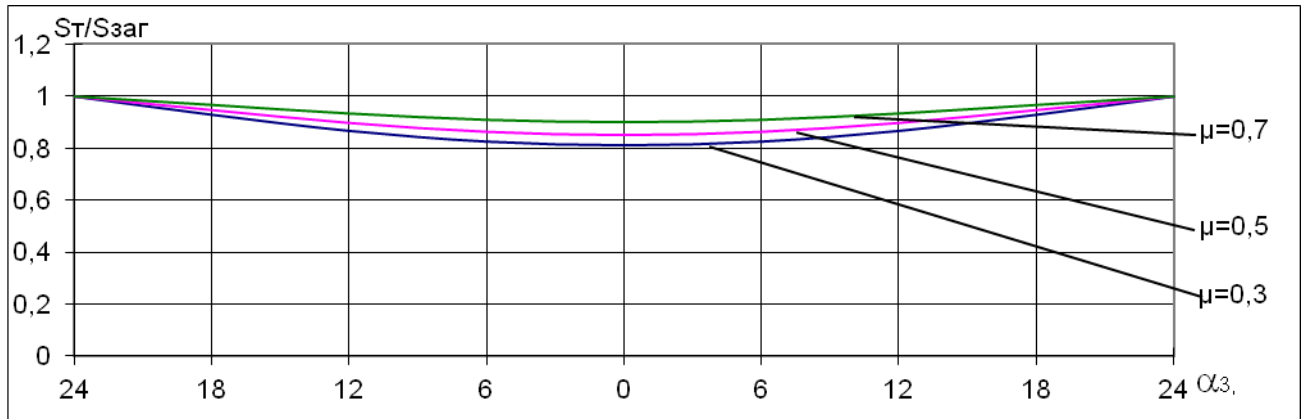


Рисунок 2.35 - Изменение $S_T / S_{заг}$ при увеличении угла α_3 и геометрических параметрах выпуклой детали $R_\rho = 2,3$; $\bar{R}_{\partial em} = 1,2$; $f = 0,3$

2.1.5 Исследование способа формообразования деталей на основе процесса отбортовки

Найдем напряжения согласно схеме действия сил (см. рисунок 1.27). Уравнение равновесия сил (при отсутствии эластичной среды по наружной поверхности заготовки) для конической детали имеет вид [97]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{матр}) = 0, \quad (2.86)$$

где σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении;

f - контактное трение заготовки, коэффициент трения;

$\alpha_{матр}$ - угол конусности матрицы.

Используем условие пластичности для трансверсальной анизотропии (2.20) и получим решение:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s^* \left(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{матр}} \right) \left(1 - \frac{r_{\text{дет}}}{\rho} \right), \quad (2.87)$$

где $r_{\text{дет}}$ - меньший радиус конической детали;

ρ - текущий радиус детали.

При $\rho = r_{\text{дет}}$; $\sigma_{\rho} = 0$. Анализ выражения (2.87) показывает, что напряжения σ_{ρ} растут с увеличением ρ . Этому должно способствовать утонению заготовки для элементов, примыкающих к большому диаметру и уменьшению размера внутреннего диаметра кольцевого выступа.

Технологически возможную толщину получим из уравнения связи напряжений и деформаций:

$$S_T = S_{\text{заг}} \left[1 - (1 - \mu) \cdot \frac{\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta} + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}} \left(\frac{\bar{\rho}_{\text{заг}}}{\rho} - 1 \right) \right], \quad (2.88)$$

Чтобы значения S_T имели постоянное значение необходимо выполнить условие минимизации [88]:

$$\int_1^{\bar{R}_{\text{дет}}} (S_{\text{дет}} - S_T)^2 d\rho \rightarrow \min, \quad (2.89)$$

где $S_{\text{дет}}$ - заданная толщина детали;

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

$r_{\text{дет}}$ - меньший радиус детали;

$\frac{R_{\text{дет}}}{r_{\text{дет}}} = \frac{\bar{R}_{\text{дет}}}{r_{\text{дет}}}$ - большой относительный радиус детали.

Варьируемыми параметрами возьмем радиус заготовки $\rho_{\text{заг}}$, который примем в виде линейной зависимости:

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_{\text{заг}}} = c + l \bar{\rho}. \quad (2.90)$$

Из двух неизвестных коэффициентов, c определим из условия, что при $\rho = r_{\text{дет}}$ (см. рисунок 2.1):

$$\rho_{заг} = r_{дем} - \Delta . \quad (2.91)$$

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

$$\bar{\rho}_{заг} = 1 - \bar{\Delta} , \quad (2.92)$$

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

$$c = \frac{1}{1 - \bar{\Delta}} - l . \quad (2.93)$$

Подставим (2.93) в (2.90) и получим:

$$\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{заг}} = \frac{1}{1 - \bar{\Delta}} + l(\bar{\rho} - 1) . \quad (2.94)$$

Зная l и c можно найти наименьший и наибольший радиусы заготовки, используя (2.94):

$$\bar{\rho}_{заг} = \frac{\bar{\rho}}{\frac{1}{1 - \bar{\Delta}} + l(\bar{\rho} - 1)} . \quad (2.95)$$

Коэффициент l позволяет определить радиус наибольший заготовки, который дает возможность получить деталь с минимальной разнотолщиной.

Выражение (2.89) примет вид с учетом безразмерных величин

$$\bar{S}_{дем} = \frac{S_{дем}}{S_{заг}} , \quad \frac{r_{дем}}{r_{дем}} = \bar{r}_{дем} , \quad \frac{R_{дем}}{r_{дем}} = \bar{R}_{дем} , \text{ т.е. от } 1 \text{ до } \bar{R}_{дем} :$$

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

Минимизацию выражения (2.89) проведем путем варьирования коэффициента l :

$$\frac{\partial}{\partial l} = \int_1^{\bar{R}_{дем}} \left\{ \bar{S}_{дем} - 1 - (1 - \mu)b + \frac{(1 - \mu)b}{(1 - \bar{\Delta})} + (1 - \mu)bl(\bar{\rho} - 1) \right\} (\bar{\rho} - 1) d\bar{\rho} = 0 , \quad (2.96)$$

$$\text{где } b = \frac{b_1 + b_2}{2} , \quad (2.97)$$

$$b_1 = 1 \text{ при } \bar{\rho} = 1; \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta} = 0; \quad (2.98)$$

$$b_2 = \frac{(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{матр}}) \left(1 - \frac{1}{R_{\text{дет}}}\right) + 1}{1 - \mu \left(1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{матр}}\right) \left(1 - \frac{1}{R_{\text{дет}}}\right)} \quad \text{при} \quad \bar{\rho} = \bar{R}_{\text{дет}}, \quad (2.99)$$

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

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

$$l = 3 \frac{1 + (1 - \mu)b - \bar{S}_{\text{дет}} - \frac{(1 - \mu)}{(1 - \Delta)}b}{2(\bar{R}_{\text{дет}} - 1)(1 - \mu)b}. \quad (2.100)$$

Чтобы вычислить l следует найти соотношение между $\bar{\Delta}$ и $\bar{S}_{\text{дет}}$; при $\bar{\rho} = r_{\text{дет}}$ или $\bar{\rho} = 1$. Из (2.88) имеем, приравняв $\bar{S}_{\text{дет}} = \bar{S}_T$ и приняв соотношения:

$$r_{\text{дет}} - r_{\text{заг}} = \Delta \quad \text{или} \quad 1 - \bar{r}_{\text{заг}} = \bar{\Delta} \quad \text{или} \quad \bar{r}_{\text{заг}} = 1 - \bar{\Delta}.$$

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

Отсюда

$$\bar{\Delta} = \frac{1 - \bar{S}_{\text{дет}}}{2 - \bar{S}_{\text{дет}} - \mu}. \quad (2.101)$$

Для наглядности проанализируем аналитические закономерности с помощью построенных графиков.

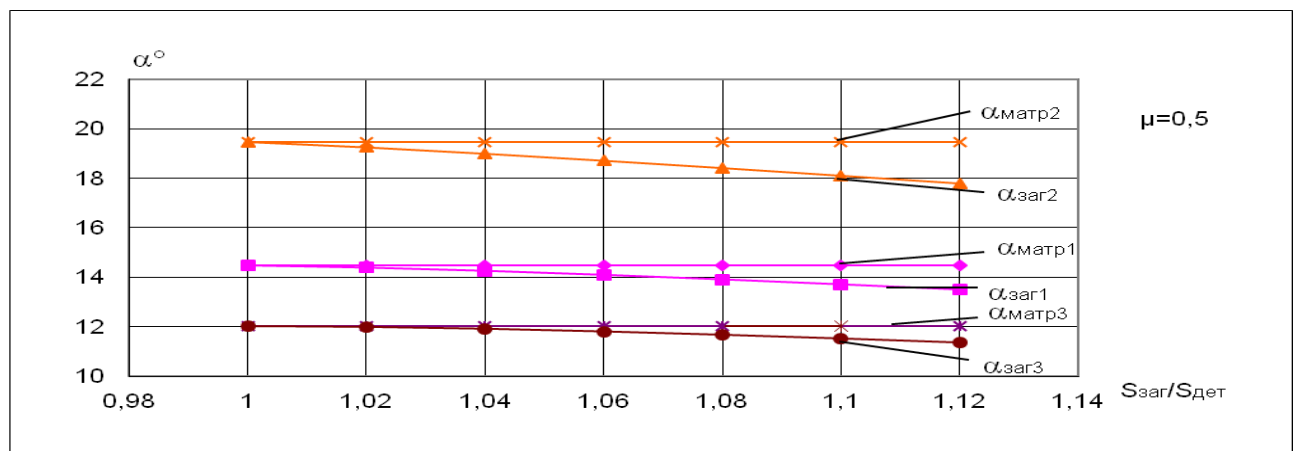


Рисунок 2.36 - Зависимость отношения $S_{\text{заг}} / S_{\text{дет}}$ от угла конусности заготовки $\alpha_{\text{заг}}$ при $\mu = 0,5$; $f = 0,1$ и различных значениях угла конусности матрицы: $\alpha_{\text{матр}1} = 14,5^\circ$; $\alpha_{\text{матр}2} = 19,5^\circ$; $\alpha_{\text{матр}3} = 12^\circ$

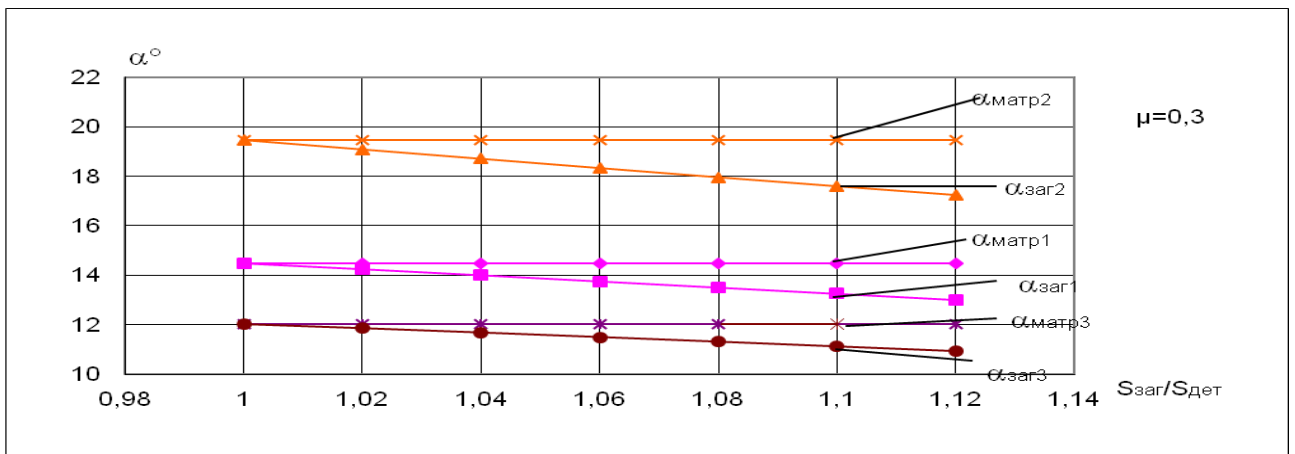


Рисунок 2.37 - Зависимость отношения s_{zag} / s_{det} от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,3$; $f = 0,1$ и различных значениях угла конусности матрицы: $\alpha_{matr1} = 14,5^\circ$; $\alpha_{matr2} = 19,5^\circ$; $\alpha_{matr3} = 12^\circ$

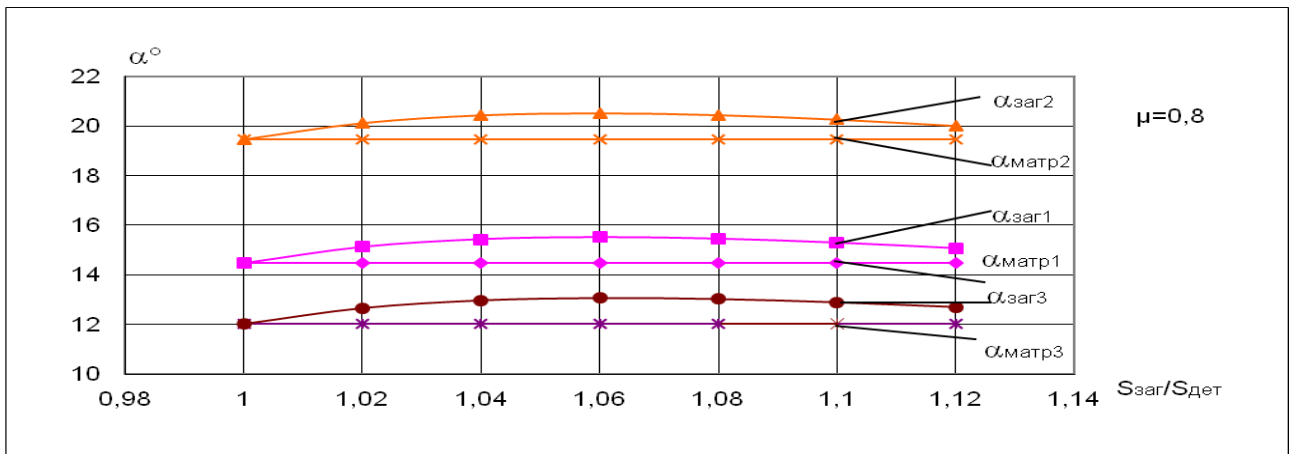


Рисунок 2.38 - Зависимость отношения s_{zag} / s_{det} от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,8$; $f = 0,1$ и различных значениях угла конусности матрицы: $\alpha_{matr1} = 14,5^\circ$; $\alpha_{matr2} = 19,5^\circ$; $\alpha_{matr3} = 12^\circ$

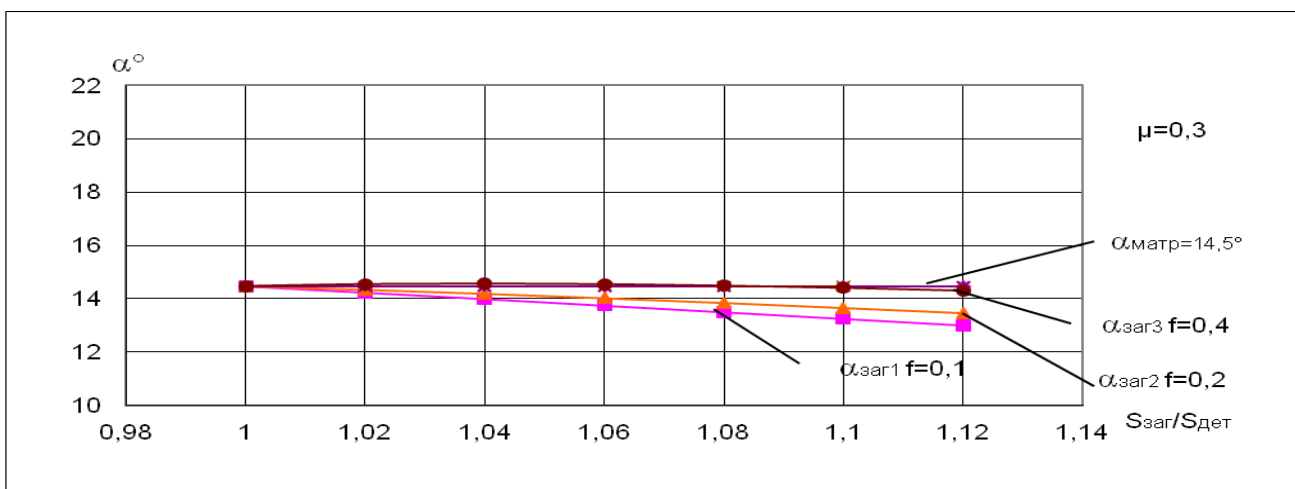


Рисунок 2.39 - Зависимость отношения s_{zag} / s_{det} от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,3$; $\alpha_{matr} = 14,5^\circ$ и различных значениях коэффициента трения

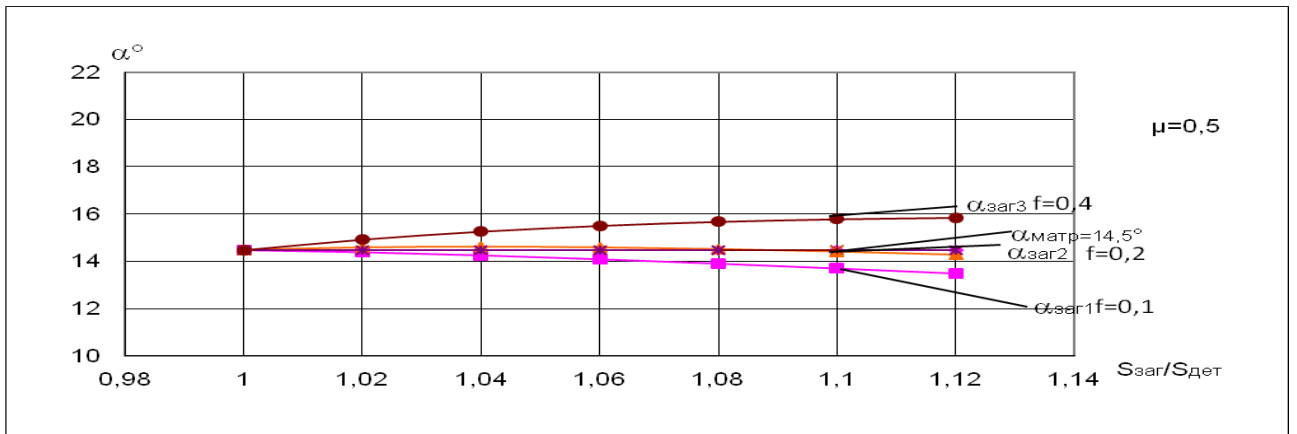


Рисунок 2.40- Зависимость отношения S_{zag} / S_{det} от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,5$; $\alpha_{matr} = 14,5^\circ$ и различных значениях коэффициента трения

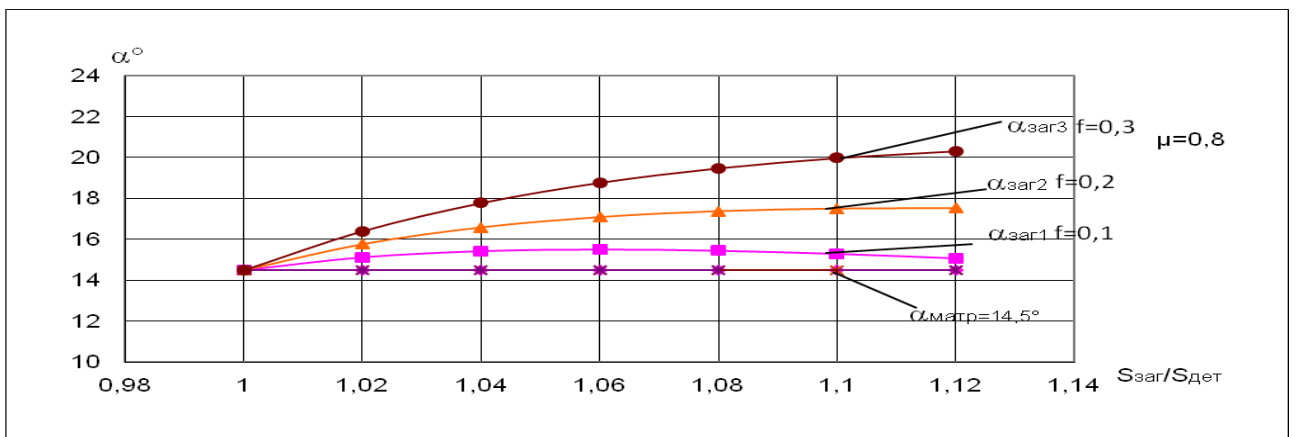


Рисунок 2.41 - Зависимость отношения S_{zag} / S_{det} от угла конусности заготовки α_{zag} при $\mu = 0,8$; $\alpha_{matr} = 14,5^\circ$ и различных значениях коэффициента трения

Задаваясь соотношением S_{det} / S_{zag} и различными значениями коэффициента анизотропии, коэффициента трения, используя формулы (2.97,2.98,2.99,2.100,2.93,2.95,2.88) построим зависимость отношения S_T / S_{zag} .

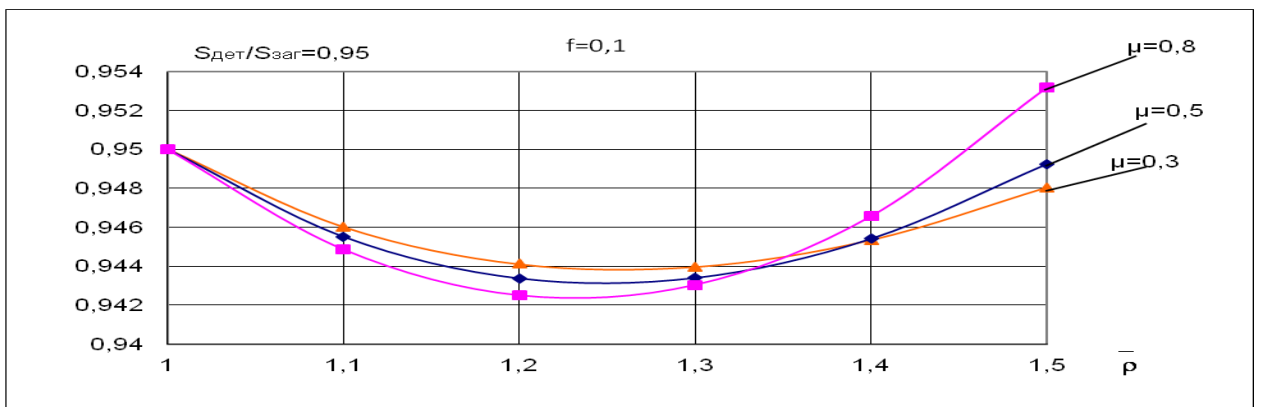


Рисунок 2.42 - Зависимость отношения S_T / S_{zag} по заданному соотношению $S_{det} / S_{zag} = 0,95$; $f = 0,1$; $\alpha_{matr} = 14,5^\circ$; $\bar{R}_{det} = 1,5$ и различных значениях коэффициента анизотропии $\mu = 0,3$; $\mu = 0,5$; $\mu = 0,8$

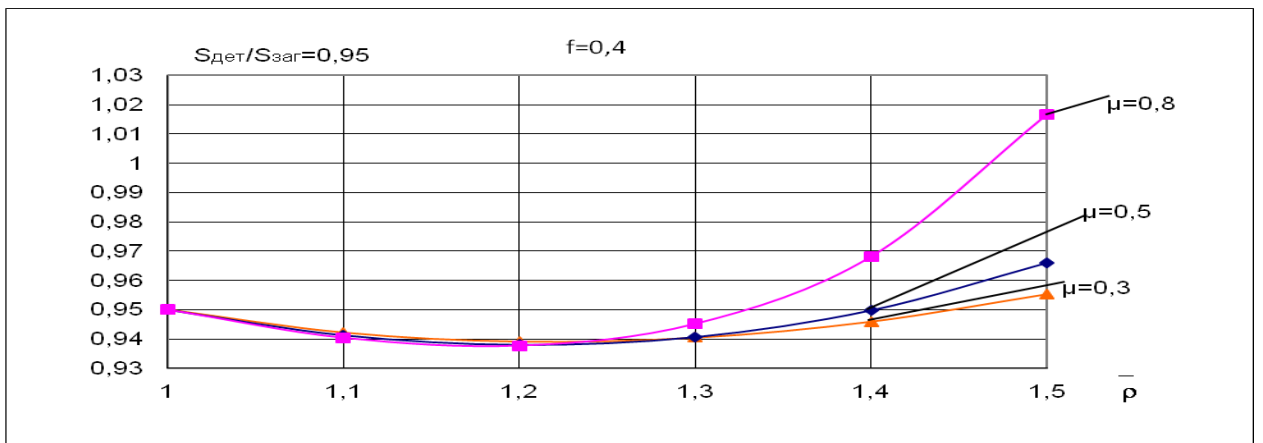


Рисунок 2.43 - Зависимость отношения S_T / S_{zag} по заданному соотношению $S_{дет} / S_{заг} = 0,95$; $f = 0,4$; $\bar{R}_{дет} = 1,5$; $\alpha_{матр} = 14,5^0$ и различных значениях коэффициента анизотропии $\mu = 0,3$; $\mu = 0,5$; $\mu = 0,8$

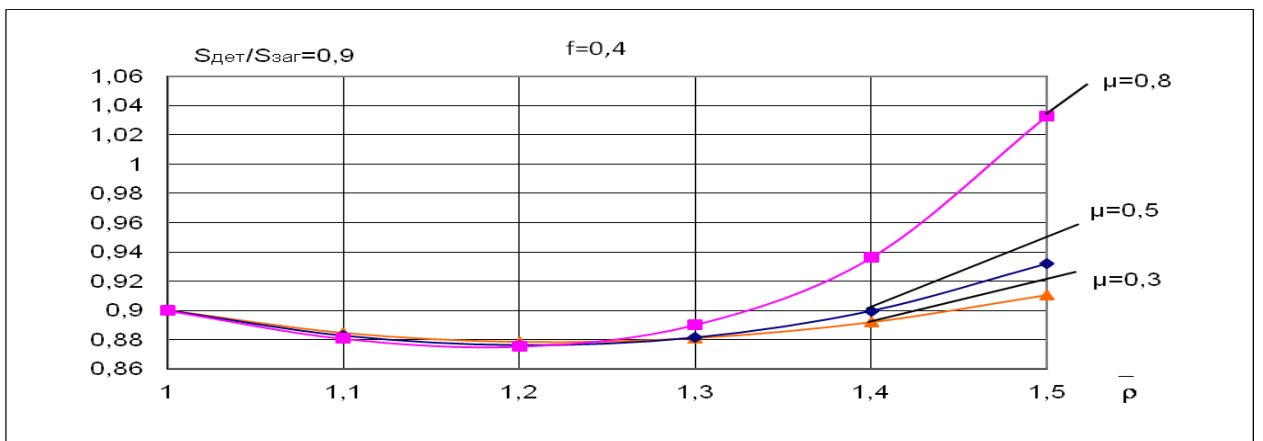


Рисунок 2.44- Зависимость отношения S_T / S_{zag} по заданному соотношению $S_{дет} / S_{заг} = 0,9$; $f = 0,4$; $\bar{R}_{дет} = 1,5$; $\alpha_{матр} = 14,5^0$ и различных значениях коэффициента анизотропии $\mu = 0,3$; $\mu = 0,5$; $\mu = 0,8$

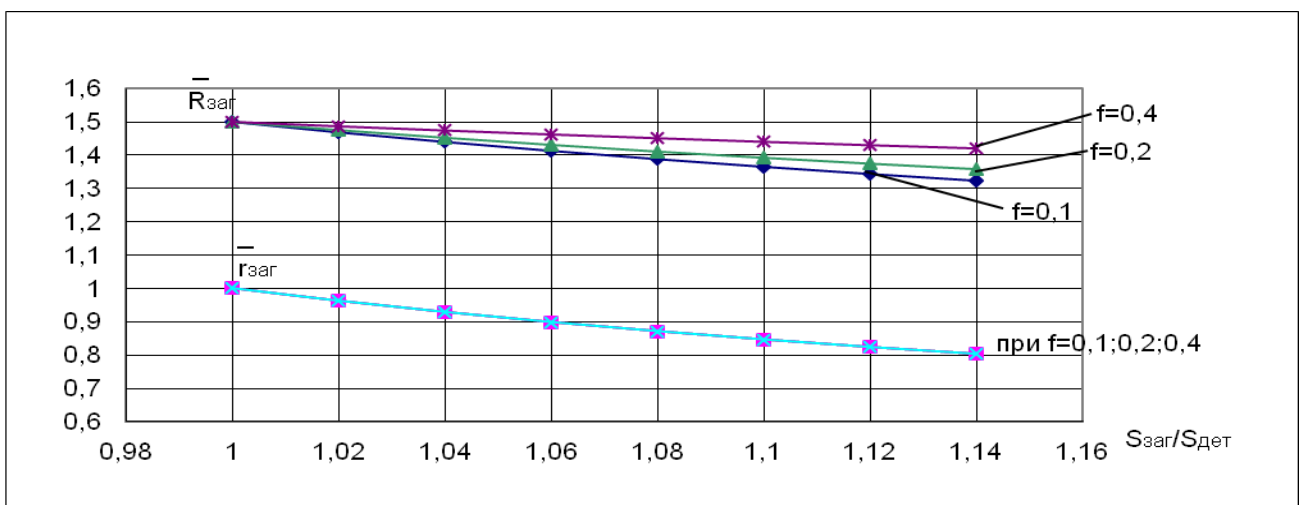


Рисунок 2.45 - Зависимость отношения большого и малого относительного радиуса заготовки от $S_{заг} / S_{дет}$ при $\bar{R}_{дет} = 1,5$; $\alpha_{матр} = 15^0$ и различных значениях коэффициента трения

По проведенной работе можно сделать выводы:

- При уменьшении коэффициента анизотропии μ сокращается разница между углами $\alpha_{матр}$ и $\alpha_{заг}$, что особенно сильно сказывается при малых значениях угла конусности матрицы $\alpha_{матр}$.
- С возрастанием коэффициента трения разница между значениями больших радиусов $R_{дет}$ и $R_{заг}$ уменьшается и с возрастанием значений коэффициента анизотропии μ эта разница практически исчезает.
- С увеличением коэффициента трения отклонения по толщине от величины заданной детали возрастает. Для значений коэффициента анизотропии $\mu \leq 0,5$ эта разница при коэффициенте трения $f = 0,1$ не превышает 1,5%, а при коэффициенте трения $f = 0,4$ - 2,5%. Минимальное отклонение от заданной толщины при малых μ составляет 1%.
- При значительных значениях коэффициента анизотропии, близких к единице, угол конусности заготовки может быть больше угла конусности детали.

Таким образом, с точки зрения получения наименьшей разнотолщинности детали способ эффективен для случая, когда имеет место наименьших значений коэффициента анизотропии μ и коэффициента трения f .

Список использованных источников

1. А.с. 1050778 А СССР, МКИЗВ21D22/28. Способ штамповки цилиндрических деталей с коническим участком со стороны открытого торца [Текст]/В.П. Чистяков, И.П. Попов, А.Г. Овчинников, В.Д. Маслов и др. (СССР). – №3431168/25-27; заявл.27.04.82; опубл. 30.10.83, Бюл. №40.
2. А.с. 1349836 А1 СССР, МКИЗВ21D22/28. Заготовка для вытяжки с обжимом [Текст]/В.П. Чистяков, И.П. Попов, В.Д. Маслов, А.И. Гостев (СССР). – №4117648/31-27; заявл. 28.05.86; опубл. 07.11.87, Бюл. №41.
3. А.с. 1391773 А1 СССР, МКИЗВ21D22/28. Способ штамповки полых деталей [Текст]/В.П. Чистяков, И.П. Попов, В.Д. Маслов и др. (СССР). – №4141544/31-27; заявл. 03.11.86; опубл. 30.04.88, Бюл. № 16.
4. А.с. 1447480 СССР, МКИ1В21D22/16. Способ изготовления тонкостенных конических деталей [Текст]/Б.А. Асвободинов, В.И. Шашков, Е.А. Филатова (СССР). – №4213222/25-27; заявл. 04.02.87; опубл. 30.12.88, Бюл. № 48.
5. А.с. 1454545 А1 СССР, МКИЗВ21D22/28. Способ штамповки конических деталей [Текст]/И.П. Попов, А.Н. Карпухин, В.Д. Маслов (СССР). – №4285746/31-27; заявл. 15.07.87; опубл. 30.01.89, Бюл. №4.
6. А.с. 1465152 СССР, МКИ4В21D22/16. Способ изготовления тонкостенных оболочек [Текст]/А.С. Чумадин, В.И. Ершов, А.Д. Ковалев, Е.М. Дебердеев (СССР). – № 4017195/31-27; заявл. 04.02.86; опубл. 05.03.89, Бюл. № 10.
7. А.с. 1563813 СССР, 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.
8. 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.

9. А.с. 633643 СССР, МКИ2В21D22/28. Способ штамповки полых осесимметричных изделий [Текст]/В.П. Чистяков, И.П. Попов, А.Г. Овчинников, В.Д. Маслов (СССР). – № 2373144/25-27; заявл. 14.06.76; опубл. 25.11.78, Бюл. № 43.
10. А.с. 755378 СССР, МКИ4В21D22/10. Способ штамповки эластичной средой [Текст]/В.К. Моисеев, В.Ф. Щеголеватых, А.Д. Комаров, Т.П. Голиусов, В.Е. Гальперин (СССР). опубл. 1980, Бюл. №30.
11. Аверкиев, А.Ю. Деформации и напряжения при раздаче полых оболочек секционным и разжимными пуансонами [Текст]/А.Ю. Аверкиев//Вестник машиностроения. – 1996. – №2. – С. 33-37.
12. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла [Текст]/А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
13. Аверкиев, Ю.А. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением [Текст]/ Ю.А. Аверкиев. – М. – Л.: Машгиз, 1957. – 215 с.
14. Аверкиев, Ю.А. Холодная штамповка [Текст]/Ю.А. Аверкиев. – Издательство Ростовского университета, 1984. – 288 с.
15. Акаро, И.Л. Машиностроение. Энциклопедия. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 [Текст]/И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и др.; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. – М.: Машиностроение, 1996. – 736 с.
16. Алюшин, Ю.А. Формоизменение полых оболочек секционным разжимным инструментом [Текст]/Ю.А. Алюшин, А.Н. Шипилов//Машиноведение. – 1987. – №1. – С. 98-104.
17. Арзамасов, Б.Н. Конструкционные материалы [Текст]: справочник /Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
18. Арышенский, Ю.М. Получение рациональной анизотропии в листах [Текст]/Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников, В.Ю. Арышенский. – М.: Металлургия, 1987. – 141 с.

19. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов [Текст]/Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
20. Арышенский, Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов [Текст]/Ю.М. Арышенский. – М.: Изд-во Саратовского университета, 1973. – 112 с.
21. Барвинок, В.А. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов [Текст]/В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров – М.: Наука и технологии, 2002. – 198 с.
22. Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст]/И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: «Вища школа», 1977. – 168 с.
23. Братухин, А.Г. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей [Текст]/Под ред. А.Г. Братухина, Г.К. Язова, Б.Е. Карасева. – М.: Машиностроение, 1997. – 416 с.
24. Глущенко, В.А. Специальные виды штамповки. Часть 1. Штамповка эластичными средами [Текст]: учебное пособие/В.А. Глущенко. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2008. – 72 с.
25. Голенков, В.А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением [Текст]/В.А. Голенков, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь, С.Ю. Радченко, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев. – М.: Машиностроение, 2004. – 464 с.
26. ГОСТ 19904 – 90. Прокат листовой холоднокатаный. Сортамент [Текст] – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 10 с.
27. ГОСТ 21631 – 1976. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические требования [Текст] – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1976. – 36 с.
28. ГОСТ 22178 – 1976. Листы из титана и титановых сплавов.

Технические требования [Текст] – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1976. – 22 с.

29. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов [Текст]/Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.

30. Григорьев, Л.Л. Холодная штамповка [Текст]: справочник /Л.Л. Григорьев, К.М. Иванов, Э.Е. Юргенсон – СПб.: Политехника, 2009. – 665 с.

31. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением [Текст]/Н.П. Громов. – М.: Металлургия, 1967. – 340 с.

32. 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.

33. 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.

34. Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением [Текст]/С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.

35. Демьяненко, Е.Г. Анализ технологических процессов отбортовки-формовки в системе LS-DYNA [Текст]/Е.Г. Демьяненко, С.Ф. Тлустенко, И.П. Попов//Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – № 2, часть 1. – С. 282-286.

36. Демьяненко, Е.Г. Возможности процесса вытяжки тонкостенных конических оболочек [Текст]/ Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Всероссийской молод. науч. конф. с международным участием IX Королевские чтения/Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – 2007. – С. 178.

37. Демьяненко, Е.Г. Исследование процесса формообразования цельноштампованных деталей по схеме отбортовка-формовка [Текст]/Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов, А.Г. Шляпугин//Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 138-145.

38. Демьяненко, Е.Г. Направленное изменение толщины конической оболочки [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Международной молод. науч.

- конф. XV Туполевские чтения/Казан. гос. техн. ун-т. – 2007.–том 1.–С. 52- 54.
39. Демьяненко, Е.Г. Определение толщины заготовки при формовке детали конической формы [Текст]/ Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Всероссийской молод. науч. конф., посвященная 75-летию УГАТУ. Мавлютовские чтения/Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – 2007. – том 2. – С.120-121.
40. Демьяненко, Е.Г. Основные допущения процесса формовки для получения тонкостенных деталей с постоянной толщиной стенки [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. XII Международной науч. конф. Решетневские чтения/Сиб. гос. аэрокосмич.ун-т. – 2008. – С. 199-201.
41. Демьяненко, Е.Г. Устройство для формовки вогнутых оболочек [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Международной молод. науч. конф. XVI Туполевские чтения/Казан. гос. техн. ун-т. – 2008. – том 1. – С. 61-63.
42. Демьяненко, Е.Г. Устройство для формовки выпуклых оболочек [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Всероссийской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов. Актуальные проблемы авиации и космонавтики/Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2008. – том 1. – С. 88-89.
43. Дмитриев, А.М. Аппроксимация кривых упрочнения металлов [Текст]/А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов//КШП ОМД. – 2004. – №1. – С. 23-26.
44. Дмитриев, А.М. Технологияковки объемной штамповки. Часть1. Объемная штамповка выдавливанием [Текст]/А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов. – М.: Высшая школа, 2002. – 400 с.
45. Ершов, В.И. Листовая штамповка: Справочник. Расчет технологических параметров [Текст]/В.И. Ершов, О.В. Попов, А.С. Чумадин. – М.: Изд-во МАИ, 1999. –516 с.
46. Ершов, В.И. Об одном из путей интенсификации процесса отбортовки отверстий [Текст]/В.И. Ершов, С.А. Федосова, А.И. Соболев //Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – №4. – С. 20-22.
47. Ершов, В.И. Об одном способе интенсификации при отбортовке листового материала [Текст]/В.И. Ершов, А.С. Чумадин, В.В. Ковалев

- //Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – №4. – С. 25-26.
48. Зильберг, Ю.В. К методике кривых упрочнения [Текст]/Ю.В. Зильберг, В.Г. Братутин, З.В. Каневский, Е.П. Сухобрус// Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 6. – С. 8-11.
49. Имшенецкий, А.А. Определение оптимальных условий штамповки осесимметричных оболочек оживальной формы [Текст]/А.А. Имшенецкий, В.П. Сабелькин, В.А. Кривцов, И.Ю. Матющенко; Харьк. авиац. ин-т. – Харьков, 1990. – 7с. – Деп. в ВНИИТЭМР 26.07.90, № 153-мш90.
50. Исаченков, Е.И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением [Текст]/Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
51. Исаченков, Е.И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст]/Е.И. Исаченков – М.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
52. 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.
53. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст]/Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
54. Каргин, В.Р. Основы инженерного эксперимента [Текст]: учебное пособие/В.Р. Каргин, В.М. Зайцев. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2001. – 86 с.
55. Каржавин, В.В. Совершенствование технологии изготовления полых коническо-цилиндрических изделий из сплава АМгб [Текст]/В.В. Каржавин, Ю.Б. Пирогов, Е.М. Файншмидт//Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – №1. – С. 22-23
56. Кассандрова, О.Н. Обработка результатов наблюдений [Текст]/О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М: Наука, 1970. – 88 с.
57. Катков, Н.П. Расчет усилия прижима, предотвращающего складкообразование при вытяжке круглых изделий [Текст]/Н.П.

- Катков//Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 12. – С. 24-26.
58. Колесов, Ю.Б. Совершенствование процесса вытяжки тонкостенных изделий [Текст] /Ю.Б. Колесов//Исследование машин и технологии кузнечно-штамповочного производства: темат. сб. науч. тр. – 1990. – С. 93-96.
59. Колесов, Ю.Б. Технология вытяжки тонкостенных деталей [Текст]/Ю.Б. Колесов//Новые промышленные технологии [Техн. прогресс в атом. прм-сти] – 1996. – №4. – С. 3-6.
60. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст]/Г. Корн, Т. Корн; под общ. ред. И.Г. Арамановича – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973. – 832с.
61. Леванов, А.Н. Контактное трение в процессах ОМД [Текст]/А.Н. Леванов, В.Л. Колмагоров, С.Л. Буркин и др. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
62. Лысов, М.И. Пластическое формообразование тонкостенных деталей авиатехники [Текст]/ М.И. Лысов, И.М. Закиров. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
63. Лысов, М.И. Формообразование деталей гибкой [Текст]/ М.И. Лысов, Н.В. Соснов. – М.: Машиностроение, 2001. – 388 с.
64. Малов, А.Н. Технология холодной штамповки [Текст]/А.Н. Малов. – М: Машиностроение, 1969. – 568 с.
65. 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.
66. Мельников, Э.Л. Холодная штамповка днищ жидкостью [Текст]/Э.Л. Мельников. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
67. 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.
68. Моисеев, В.К. Управление разнотолщиной полых изделий

посредством эластичного инструмента [Текст]/Моисеев В.К.//Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2004. – №1 – С. 100-104.

69. Моисеев, В.К. Штамповка осесимметричных деталей эластичным инструментом переменной жесткости [Текст]/В.К. Моисеев//Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – №1. – С. 19-21.

70. Мошнин, Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей [Текст]/Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1973. – 240 с.

71. Николенко, К.А. Формообразование тонкостенных крутоизогнутых отводов в инструментальных штампах [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.03.05: защищена 21.03.2008/ Николенко Константин Анатольевич. – Самара, 2008. – 170 с.

72. Овчинников, А.Г. О выборе кривошипного пресса для вытяжки [Текст]/А.Г. Овчинников //Кузнечно-штамповочное производство. – 1961. – №12. – С. 30-33.

73. Орленко, Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках [Текст]/Л.П. Орленко. – М.: Машиностроение, 1964. – 168 с.

74. 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 Самарский аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева. – 2010140398; заявл. 02.04.2008; опубл. 10.03.2011, Бюл. №7.

75. 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 Самарский аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева. – 2011144942/02; заявл. 07.11.2011; опубл. 27.04.2012, Бюл. №12.

76. 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 Самарский аэрокосмический университет им.

академика С.П. Королева. – 2012147877/02; заявл. 09.11.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. №5.

77. 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.

78. Пат. 2007242 Российская Федерация, МПК7B21D22/14. Способ ротационной вытяжки конических изделий [Текст]/Зубарев В.В.; заявитель и патентообладатель Зубарев В.В. – № 5024612/27; заявл. 25.12.91; опубл. 15.02.94, Бюл. № 3.

79. Пат. 2148460 Российская Федерация, МПК6B21D22/20. Способ вытяжки деталей из тонкостенных листовых заготовок [Текст]/Иванов Ю.Л.; заявитель и патентообладатель Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение. – № 98113026/02; заявл. 29.06.98; опубл. 10.05.00, Бюл. №13.

80. Пат. 2157739 Российская Федерация, МПК7B21D51/08, B21D22/28. Способ изготовления тонкостенных оболочек с днищем сферической формы [Текст]/Поздов И.Н.; заявитель и патентообладатель Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики. – №98108949/02; заявл. 08.05.98; опубл. 20.10.00.

81. Пат. 58055 Российская Федерация, МПК7B21D22/30. Устройство для формообразования оболочек сужающейся формы [Текст]/И.П. Попов, В.Д. Маслов, Е.Г. Демьяненко; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – 2006117037/22; заявл. 17.05.2006; опубл. 10.11.2006, Бюл. № 31.

82. 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 Самарский аэрокосмический университет им.

академика С.П. Королева. – 2008112698; заявл. 02.04.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.

83. Пономарев, С.Д. Расчеты на прочность в машиностроении. Том 2. Некоторые задачи прикладной теории упругости. Расчеты за пределами упругости. Расчеты на ползучесть [Текст]/С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев, В.М. Макушкин, Н.Н. Малинин, В.И. Феодосьев. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1958. – 974 с.

84. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки [Текст]/Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

85. 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.

86. Попов, И.П. Исследование процессов листовой инструментальной штамповки деталей авиационной техники [Текст]: лабораторный практикум/И.П. Попов. – Куйбышев: Куйбышевский авиационный ин-т., 1988. – 48 с.

87. 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.

88. Попов, И.П. Направленное изменение толщины листовой заготовки в процессах пластического деформирования [Текст]: учебное пособие/И.П. Попов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2006. – 74с.

89. Попов, И.П. Вытяжка тонколистового материала [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко// Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. - № 10. – С. 30-33.

90. Попов, И.П. Штампы для изготовления тонкостенных сварных оболочек [Текст]/И.П. Попов, Е.Г. Демьяненко//Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – № 12. – С. 25-27.

91. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст]/В.П.

- Романовский – Л.: Машиностроение, 1965. – 226 с.
92. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст]/В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
93. Рудман, Л.И. Справочник конструктора штампов. Листовая штамповка [Текст]/Л.И. Рудман. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.
94. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст]/Л.З. Румшинский. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. – 192с.
95. Семенов, Е.И. Ковка и штамповка [Текст]/Е.И. Семенов. – М.: Машиностроение, 1987. – 234 с.
96. Степанов, В.Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов [Текст]/В.Г. Степанов, И.А. Шавров. – Л.: Машиностроение, 1975. – 278 с.
97. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст]/М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
98. Томленов, А.Д. Влияние анизотропии листового металла на процессы пластического формоизменения [Текст]/А.Д. Томленов//Кузнечно-штамповочное производство. – 1962. – № 4. – С. 1-2.
99. Томленов, А.Д. Пластическое течение металлов [Текст]/А.Д. Томленов. – М.: Наука, 1968. – 148 с.
100. Тумасян, Р.З. Стали и стальная металлопродукция [Текст]: справочник/Р.З. Тумасян, В.И. Игрицкий, А.Р. Тумасян, И.В. Игрицкий. – М.: НПО «Реклама, информация, маркетинг» ЦЭНДИСИ СССР совместно с МП «Истра», 1991. – 591 с.
101. Унков, Е.П. Теорияковки и штамповки [Текст]: учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов/Е.П. Унков, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; под общ. ред. Е. П. Ункова, А.Г. Овчинникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.
102. Чертавских, А.К. Трение и технологическая смазка при обработке

металлов давлением [Текст]/А.К. Чертавских, В.К. Белосевич. – М.: Металлургия, 1968. – 364 с.

103. Шевелев, В.В. Влияние параметров анизотропии и вытяжки на толщину стенки стакана. Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых материалов [Текст]/В.В. Шевелев. – Тула, 1968. – 253 с.

104. Шофман, Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки [Текст]/Л.А. Шофман. – М.: Машиностроение, 1964. – 375 с.

105. Шулепов, А.П. Проектирование технологической оснастки [Текст]: учебник/А.П. Шулепов, В.А. Шманев, И.Л. Шитарев; под общ. ред. А.П. Шулепова. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 1996. – 332 с.

106. Щуровский, Д. В. Расчет напряженно-деформированного состояния заготовки при формообразовании обтяжкой оболочки двояковыпуклой формы с минимальной разнотолщинностью [Текст]/Д.В. Щуровский// Тез. док. Всероссийской молод. науч. конф. VII Королевские чтения/Издательство Самарского научного центра Российской академии наук. – 2003. – том 1. – С. 174 – 175.

107. Яковлев, С.С. Теория холодной штамповки анизотропных листовых материалов [Текст]: учебное пособие/С.С. Яковлев, С.П. Яковлев – Тул. гос. ун-т.- Тула: ТулГУ, 1996. – 103 с.

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)

ТЕХНОЛОГИИ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электронные методические указания
к лабораторным работам

САМАРА 2013

Составители: Демьяненко Елена Геннадьевна

Попов Игорь Петрович

Технологии авиационно-космического назначения с использованием новых листовых материалов [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); - сост. Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов. – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,27 Мбайт). - Самара, 2013.

Исследуются новые способы деформирования. Рассмотренные механизмы формообразования, определяются основные технологические параметры способов, размеры заготовки, усилие, толщины детали вдоль образующей.

Указания предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением и воздействия электромагнитных источников», изучающих дисциплину «Технологии авиационно-космического назначения с использованием новых листовых материалов».

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1	Исследование процесса отбортовки-формовки тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок	5
2	Исследование способа формообразования тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок с созданием активных сил трения на границе эластичный элемент – заготовка.....	13
3	Исследование процесса отбортовки из конической заготовки	25

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_σ - 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.

1 Исследование процесса отбортовки-формовки тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок

Цель работы

Исследование процесса формовки

Задачи

1. Выявить механизм процесса и определить схему напряженно-деформированного состояния процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок.
2. Обосновать процесс формовки.
3. Определить основные параметры процесса:
 - 3.1 размеры заготовки;
 - 3.2 усилие процесса.

Механизм процесса формовки

Способ, основанный на процессах отбортовки-формовки из сварной листовой заготовки перспективен для получения тонкостенных осесимметричных изделий. С его помощью появилась возможность добиться равномерной толщины изделия и уменьшения толщины исходной заготовки на 45-50% за счет сокращения припуска на механическую обработку по толщине для высоких деталей усеченной сужающейся формы из жаропрочных сплавов. Технологические процессы их изготовления с использованием заготовки со сварным швом базируются на способах формообразования, которые характеризуются в плоскости листа напряженным состоянием растяжения.

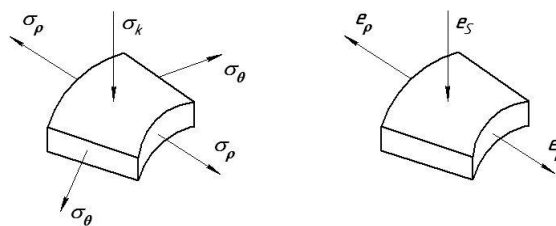


Рисунок 1- Схема всестороннего растяжения

Точность отштампованного изделия исследуемым способом соответствует 5-6 качеству. Поверхность инструмента в местах зажима заготовки имеет шероховатость в виде мелкой насечки.

На рисунке 1 показана схема всестороннего растяжения заготовки, которая реализуется в устройстве, представленном на рисунке 2.

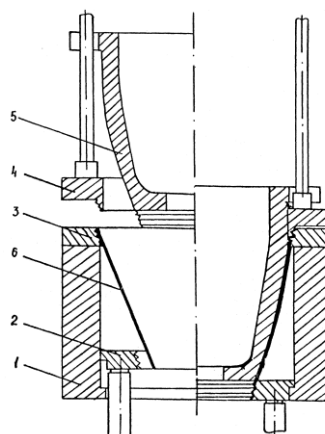


Рисунок 2 - Устройство для формообразования (слева от оси в открытом, а справа от оси в закрытом положении)

Устройство предназначено для промышленного гидравлического прессы двойного действия с гидроподушкой типа П233 и состоит из (А.с. 1748905 СССР № 4760202) подкладной плиты 1, выталкивателя 2, матрицы 3, прижима 4, пуансона 5.

Обоснование процесса формовки

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.

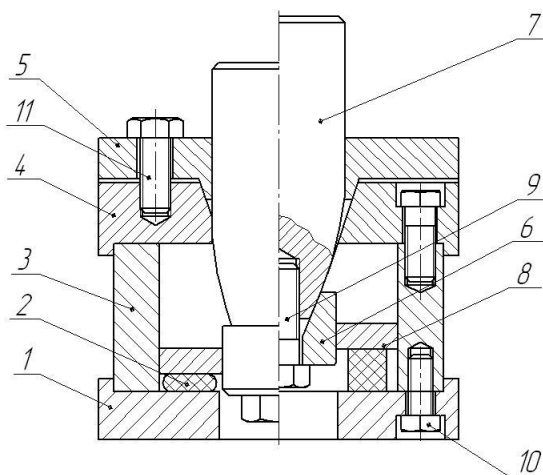
Оборудование, оснастка, материал, инструмент

Для осуществления процесса формовки в лабораторных исследованиях применяют универсальную гидравлическую машину ЦДМПУ-30, с силоизмерителем до 300 кН (цена деления шкалы – 0,1 кН). Скорость перемещения траверсы 0-10 мм/сек.

В качестве оснастки используют экспериментальный штамп (см. рисунок 3). Абсолютные размеры штампа выбраны из следующего условия:

- веса штампа удобного для проведения экспериментов (15 кг);

- относительных размеров заготовки $\frac{S_{заг}}{D} < 0,008$.



1 - плита штампа; 2 - эластичный буфер; 3 - контейнер; 4 - матрица; 5 - прижим; 6 - выталкиватель; 7 - пуансон; 8 - подкладная плита; 9 - болт; 10 - винт; 11 - болт

Рисунок 3 - Общий вид штампа

Штамп состоит из плиты 1, на которую размещают контейнер 3. Внутри контейнера находятся эластичный буфер 2, установленный на плиту штампа

1, подкладная плита 8. На плиту штампа 1 устанавливают эластичный буфер 2, а сверху на него укладывают подкладную плиту 8. Пуансон 7 и выталкиватель 6 движутся внутри контейнера, зажимая меньший диаметр конической усеченной заготовки. Сверху на контейнер устанавливают матрицу 4, к которой прижимом 5 придавливается верхняя часть усеченного конуса заготовки. Усилие прижима 5 передается с помощью болтов 11. Коническая усеченная заготовка устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 4, а прилегающие к торцу меньшего основания, на выталкиватель 6. Затем заготовка зажимается по внутренним поверхностям к матрице 4 прижимом 5, а к выталкивателю 6 пуансоном 7. Инструмент, где происходит зажим заготовки, выполнен с рабочими поверхностями, имеющими конусность, совпадающей с конусностью заготовки. Такая геометрия позволяет надежно закрепить заготовку до момента пластического деформирования. Включается рабочий ход машины. Верхняя плита пресса давит на пуансон. Идет процесс формовки. Пуансон перемещается вниз, и происходит пластическая деформация заготовки в условиях напряженно-деформированного состояния плоского растяжения. Процесс пластического формообразования производится до полного прилегания заготовки по всей поверхности пуансона, ограниченной размерами готовой детали. С силоизмерителя ЦДМПУ-30 снимают показание усилия процесса.

Прижим, матрица, выталкиватель, пуансон изготавливают из стали 45 (Ст 45). Остальные рабочие элементы штампа изготовлены из стали 3 (Ст 3).

Внутренний диаметр контейнера определен из условия, чтобы величина смещенного объема не превышала 25% от объема эластичного элемента, заключенного в объеме контейнера.

Для определения величины деформации по толщине применяют мерительную скобу с индикатором часового типа. Цена деления шкалы индикатора - 0,01 мм. Для замера и нанесения линейных размеров используют штангенциркуль и штангенрейсмус с ценой деления 0,05 мм.

Материалом для заготовки выбрана сталь 12X18H10T. Механические свойства и константы упрочнения материала приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Механические свойства и константы упрочнения для стали 12X18H10T

Материал	δ_p	μ	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{ш}$, МПа	A , МПа	n	П , МПа	σ_{T_0} , МПа
12X18H10T $S_{заг} = 0,5$ мм	0,052	0,5	272,07	430,38	452,76	719	0,16	2867,86	266,33

n , A - показатели механических свойств материала;

$\sigma_{ш}$ - напряжения в момент появления шейки;

σ_B - предел прочности;

$\sigma_{0,2}$ - условный предел текучести.

Порядок выполнения работы

Коническая заготовка (см. рисунок 4) с учетом размеров штамповой оснастки имеет размеры: $d = 21 \text{ мм}$, $D = 53 \text{ мм}$, $\alpha_{заг} = 18^\circ$, $S_{заг} = 0,5 \text{ мм}$.

1. Определяют размеры заготовки под развертку.

Для построения развертки из условия равенства длин окружностей большего и меньшего диаметров, образующей конической оболочки, длинами дуг и высотой развертки имеем (см. рисунок 4):

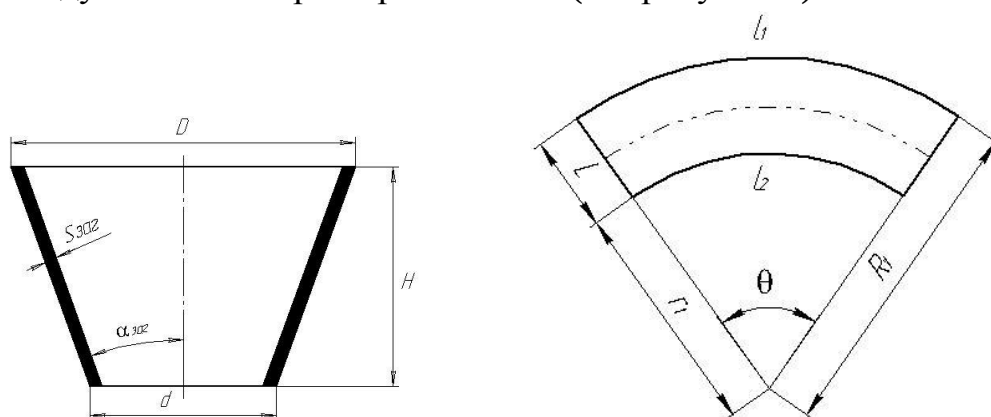


Рисунок 4 - Схема заготовки и развертки

$$R_1 - r_1 = \frac{D_3 - d_3}{2 \sin \alpha_{заг}}, \quad l_1 = \pi D_3 = R_1 \theta, \quad l_2 = \pi d_3 = r_1 \theta,$$

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;

d - диаметр меньшего основания детали;

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

d_3 - диаметр меньшего основания заготовки с учетом припуска под зажимы;

D_3 - диаметр большего основания заготовки с учетом припуска под зажимы.

Размеры заготовки по меньшему диаметру d_3 и большему диаметру D_3 находятся с учетом припуска под зажимы:

$$d_3 = d + 2(7 \div 12) \cdot S_{\text{заг}} \sin \alpha_{\text{заг}}, \quad D_3 = D + 2(7 \div 10) \cdot S_{\text{заг}} \sin \alpha_{\text{заг}},$$

Решив систему 3-х уравнений относительно R_1, r_1, θ , получим:

$$\theta = 2\pi \sin \alpha_{\text{заг}},$$

$$R_1 = \frac{l_1}{\theta},$$

$$r_1 = \frac{l_2}{\theta}.$$

2. На развертку наносят разметку для определения толщины детали, после проведенного эксперимента.

3. Сворачивают развертку на оправке.

4. Устанавливают заготовку в штамп.

По меньшему основанию зажимают ее болтом 9 между пуансоном и выталкивателем.

5. Собирают штамп.

Помещают в него эластичный буфер, сверху на него укладывают подкладную плиту. Прижимают заготовку по большему основанию с помощью конического прижима и болтов 11.

6. Устанавливают штамповую оснастку на пресс и прикладывают усилие, равное 10-15 мм величине хода.

7. Вынимают заготовку, разбирая штамп в обратном порядке.

8. Определяют усилие по силоизмерителю.

9. Замеряют толщину детали и обрабатывают результаты.

Для определения толщины детали после формовки применяют индикаторные стойки. Замеры толщины проводят на каждом из шести кольцевых элементов детали в сечении противоположном стыку и многократно (6 раз) в каждом кольцевом элементе.

При статистической обработке результатов эксперимента определяют среднее значение параметра и оценивают точность его вычисления. Среднее значение вычисляется по формуле:

$$S_{\text{ср.}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i,$$

где S_i - значение толщины для i -й точки;

n - число измерений.

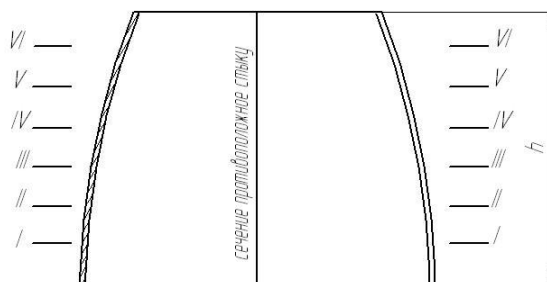


Рисунок 5 - Схема замеров детали

Для оценки случайной ошибки измерений используют величину выборочного среднеквадратичного отклонения или среднеквадратичной ошибки:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - s_{cp})^2}{n(n-1)}}.$$

Поскольку замер толщины связан со случайными ошибками, находят абсолютную погрешность измерений (доверительный интервал). Ширину доверительного интервала Δx для математического ожидания определяют числом измерений и вычисляют по формуле:

$$\Delta x = S \cdot t,$$

где t - коэффициент Стьюдента, величина которого зависит от объема выборки n и заданной доверительной вероятности α ; $t=2,02$ при $\alpha=90\%$ и $n=6$. Заполняют таблицу замеров:

Таблица 2 - Значения толщины (мм) детали из стали 12X18H10T

№ за- мера № сече- ния	1	2	3	4	5	6	Среднее значение толщины	Средне- квадрат. откл.	Ширина доверит. интерва- ла
I-I									
II-II									
III-III									
IV-IV									
V-V									
VI-VI									

10. *Определяют теоретическое значение усилия процесса формовки.*
Усилие процесса формовки деталей определяют по формуле:

$$P = \sigma_p \pi D S_{дет},$$

где D - диаметр большего основания детали.

Напряжения в меридиональном направлении σ_ρ вычисляют по формуле:

$$\sigma_\rho = \frac{\sigma_{To}}{\sqrt{1 - \mu^2}} + \frac{\Pi}{1 - \mu^2} \left(\frac{S_{заг} - S_{dem}}{S_{заг}} \right),$$

где Π - модуль упрочнения;

σ_{To} - экстраполированный предел текучести;

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

Механические свойства материала берут из таблицы 1.

2 Исследование способа формообразования тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок с созданием активных сил трения на границе эластичный элемент – заготовка

Цель работы

Исследование процесса формовки

Задачи

1. Выявить механизм процесса и определить схему напряженно-деформированного состояния процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок.
2. Обосновать процесс формовки.
3. Определить основные параметры процесса:
 - 3.1 размеры заготовки;
 - 3.2 усилие процесса.

Механизм процесса формовки

В основу предлагаемого устройства (Патент 78709 - 2008112698) заложена задача: повысить качество заготовок и изготовить детали с равномерной толщиной (см. рисунок 2). Технологические процессы их изготовления с использованием заготовки со сварным швом базируются на способах формообразования, которые характеризуются в плоскости листа напряженным состоянием растяжения (см. рисунок 1).

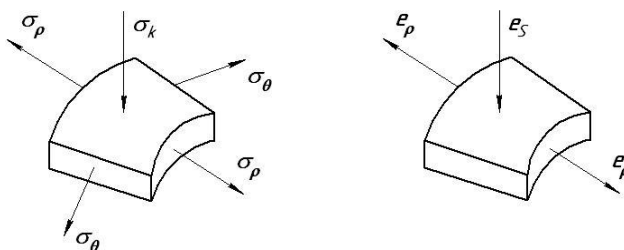
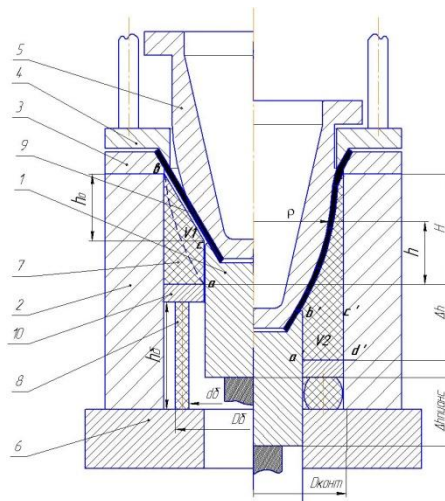


Рисунок 1- Схема всестороннего растяжения



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

Рисунок 2 - Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей выпуклой формы

Устройство предназначено для промышленного гидравлического пресса двойного действия с гидроподушкой типа П233 и состоит из выталкивателя 1, контейнера 2, матрицы 3, прижима 4, пуансона 5, плиты штампа 6, эластичного элемента 7, буферного устройства 8 (либо пресса, либо штампа, что определяется необходимостью промышленного производства или эксперимента), подкладной плиты 10.

Обоснование процесса формовки

Заготовка 9, в виде усечённого конуса устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 3, а прилегающие 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, совпадающей 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 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

утолнения 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.

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 подкладную 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:

$$\frac{\pi (D_{\text{конт}}^2 - d^2)}{4} q = \frac{\pi (D_{\text{б}}^2 - d_{\text{б}}^2)}{4} q_{\text{б}}, \quad (1)$$

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 (1) находим:

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

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

$$\frac{V_1}{V_{\text{эл. элем.}}} \leq \varepsilon \leq 0,25, \quad (3)$$

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

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

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.

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

$$V_{кон} = \frac{\pi}{12} h_0 (D^2 + Dd + d^2). \quad (5)$$

Определим диаметр контейнера с учетом записи (3):

$$D_{конт} = \left(\frac{V_1}{\varepsilon} + V_{кон} + V_{цил} \right) \frac{4}{h_{эл.цил} \cdot \pi}. \quad (6)$$

Объем смещенной части эластичного элемента при формообразовании выпуклой детали вычисляется:

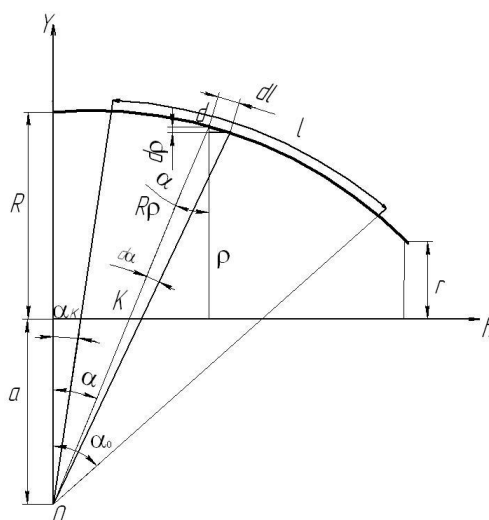
$$V_1 = V_{дет} - V_{цил} - V_{кон}, \quad (7)$$

где $V_{дет}$ - объем, детали без учета припусков под зажимы, равный (см. рисунок 3):

$$V_{дет} = 2\rho\pi R_\rho^2 a (\alpha_0 - \alpha_k) - \frac{\pi R_\rho^3}{2} (\alpha_0 - \alpha_k + 0,5 \sin 2\alpha_0 - 0,5 \sin 2\alpha_k) - 2\pi R_\rho a^2 (\alpha_0 - \alpha_k), \quad (8)$$

где:

$$\sin \alpha_k = \sin \alpha_0 - \frac{h_{дет}}{R_\rho}. \quad (9)$$



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_p до оси симметрии; l - участок с длиной образующей, где происходит непосредственный контакт пуансона с заготовкой

Рисунок 3 - Геометрическая схема детали выпуклой формы для определения объема и площади детали

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:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_\delta}{h_\delta} , \quad (10)$$

где Δh_δ - величина сжатия эластичного буфера.

Последние соотношения позволяют определить высоту эластичного буфера:

$$\frac{(D_\delta - d_\delta)}{M} = h_\delta , \quad (11)$$

$$h_\delta = \frac{\Delta h_\delta}{\varepsilon} . \quad (12)$$

Приравняв два последних равенства, получим:

$$M = \frac{\Delta h_\delta}{\varepsilon (D_\delta - d_\delta)} . \quad (13)$$

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:

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

Из условия равенства $V_1 = V_2$ находим:

$$\Delta h_{\epsilon} = \frac{4V_1}{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)}. \quad (14)$$

Далее по номограмме выбирают точку пересечения трех линий: горизонтальной прямой, соответствующей давлению эластичного буфера; вертикальной прямой, соответствующей выбранному значению деформации сжатия буфера; кривой зависимости $q_{\epsilon} = f(\epsilon)$ при геометрическом соотношении m . Причем значения m и ϵ должны удовлетворять зависимости (13). По формулам (11,12) определялась 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_{ϵ} больше величины перемещения пуансона Δh :

$$\Delta h_{\epsilon} = \frac{4V_1}{\pi(D_{\text{конт}}^2 - d^2)} \geq \Delta h. \quad (15)$$

Из выражения (15) найдем величину диаметра контейнера, удовлетворяющую выполнению условия:

$$D_{\text{конт}} = \sqrt{\frac{4V_1}{\pi \Delta h_{\epsilon}} + d^2}. \quad (16)$$

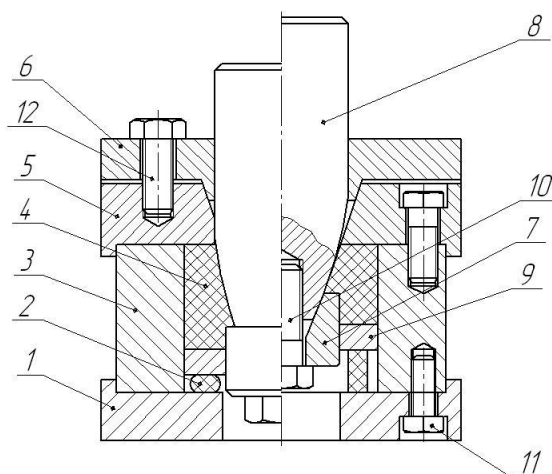
Использование устройства предлагаемой конструкции позволяет формировать тонкостенных осесимметричных детали выпуклой формы с большими отклонениями диаметров большого основания к меньшему и, регулируя давление заготовки на пуансон с помощью эластичного элемента, добиться равномерного распределения толщины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

Оборудование, оснастка, материал, инструмент

Для осуществления процесса формовки в лабораторных исследованиях применяют универсальную гидравлическую машину ЦДМПУ-30, с силоизмерителем до 300 кН (цена деления шкалы – 0,1 кН). Скорость перемещения траверсы 0-10 мм/сек.

В качестве оснастки используют экспериментальный штамп (см. рисунок 3). Абсолютные размеры штампа выбраны из следующего условия:

- веса штампа удобного для проведения экспериментов (15 кг);
- относительных размеров заготовки $\frac{S_{заг}}{D} < 0,008$.



1 - плита штампа; 2 - эластичный буфер; 3 - контейнер; 4 - эластичный элемент; 5 - матрица; 6 - прижим; 7 - выталкиватель; 8 - пуансон; 9 - подкладная плита; 10 - болт; 11 - винт; 12 - болт

Рисунок 3 - Общий вид штампа

Штамп состоит из плиты 1, на которую размещают контейнер 3. Внутри контейнера находятся эластичный буфер 2, установленный на плиту штампа 1, подкладная плита 9, эластичный элемент 4. На плиту штампа 1 устанавливают эластичный буфер 2, а сверху на него укладывают подкладную плиту 9 и эластичный элемент 4 располагают на ней же. Пуансон 8 и выталкиватель 7 движутся внутри контейнера, зажимая меньший диаметр конической усеченной заготовки. Сверху на контейнер устанавливают матрицу 5, к которой прижимом 6 прижимается верхняя часть усечённого конуса заготовки. Усилие прижима 6 передают с помощью болтов 12. Коническая усеченная заготовка 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, совпадающей с конусностью заготовки. Такая геометрия позволяет надежно закрепить заготовку до момента пластического деформирования. Включается рабочий ход машины. Верхняя плита прессы давит на пуансон. Идет процесс формовки. Пуансон перемещается вниз, и происходит пластическая деформация заготовки в условиях напряженно-деформированного состояния

плоского растяжения. Процесс пластического формообразования производится до полного прилегания заготовки по всей поверхности пуансона, ограниченной размерами готовой детали. С силоизмерителя ЦДМПУ-30 снимают показание усилия процесса.

Прижим, матрица, выталкиватель, пуансон изготавливают из стали 45 (Ст 45); эластичный элемент - из резины, твердость которой составляет 50 (модуль упругости $E=30 \text{ кг/см}^2$). Остальные рабочие элементы штампа изготовлены из стали 3 (Ст 3).

Внутренний диаметр контейнера определен из условия, чтобы величина смещенного объема не превышала 25% от объема эластичного элемента, заключенного в объеме контейнера.

Для определения величины деформации по толщине применяют мерительную скобу с индикатором часового типа. Цена деления шкалы индикатора - 0,01 мм. Для замера и нанесения линейных размеров используют штангенциркуль и штангенрейсмус с ценой деления 0,05 мм.

Материалом для заготовки выбрана сталь 12X18H10T. Механические свойства и константы упрочнения материала приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Механические свойства и константы упрочнения для стали 12X18H10T

Материал	δ_p	μ	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{ш}$, МПа	A , МПа	n	П , МПа	σ_{T_0} , МПа
12X18H10T $S_{заг} = 0,5 \text{ мм}$	0,052	0,5	272,07	430,38	452,76	719	0,16	2867,86	266,33

n , A - показатели механических свойств материала;

$\sigma_{ш}$ - напряжения в момент появления шейки;

σ_B - предел прочности;

$\sigma_{0,2}$ - условный предел текучести.

Порядок выполнения работы

Коническая заготовка (см. рисунок 4) с учетом размеров штамповой оснастки имеет размеры: $d = 21 \text{ мм}$, $D = 53 \text{ мм}$, $\alpha_{заг} = 18^\circ$, $S_{заг} = 0,5 \text{ мм}$.

1. Определяют размеры заготовки под развертку.

Для построения развертки из условия равенства длин окружностей большего и меньшего диаметров, образующей конической оболочки, длинами дуг и высотой развертки имеем (см. рисунок 4):

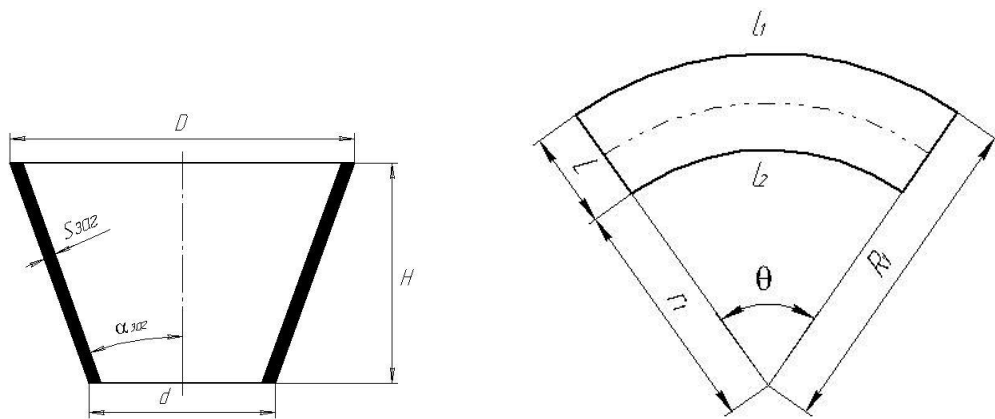


Рисунок 4 - Схема заготовки и развертки

$$R_1 - r_1 = \frac{D_3 - d_3}{2 \sin \alpha_{заг}}, \quad l_1 = \pi D_3 = R_1 \theta, \quad l_2 = \pi d_3 = r_1 \theta,$$

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;

d - диаметр меньшего основания детали;

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

d_3 - диаметр меньшего основания заготовки с учетом припуска под зажимы;

D_3 - диаметр большего основания заготовки с учетом припуска под зажимы.

Размеры заготовки по меньшему диаметру d_3 и большему диаметру D_3 находятся с учетом припуска под зажимы:

$$d_3 = d + 2(7 \div 12) \cdot S_{заг} \sin \alpha_{заг}, \quad D_3 = D + 2(7 \div 10) \cdot S_{заг} \sin \alpha_{заг},$$

Решив систему 3-х уравнений относительно R_1, r_1, θ , получим:

$$\theta = 2\pi \sin \alpha_{заг},$$

$$R_1 = \frac{l_1}{\theta},$$

$$r_1 = \frac{l_2}{\theta}.$$

2. На развертку наносят разметку для определения толщины детали, после проведенного эксперимента.

3. *Сворачивают развертку на оправке.*

4. *Устанавливают заготовку в штамп.*

По меньшему основанию зажимают ее болтом 10 между пуансоном и выталкивателем.

5. *Собирают штамп.*

Помещают в него эластичный буфер, сверху на него укладывают подкладную плиту и эластичный элемент. Прижимают заготовку по большему основанию с помощью конического прижима и болтов 12.

6. *Устанавливают штамповую оснастку на пресс и прикладывают усилие, равное 10-15 мм величине хода.*

7. *Вынимают заготовку, разбирая штамп в обратном порядке.*

8. *Определяют усилие по силоизмерителю.*

9. *Замеряют толщину детали и обрабатывают результаты.*

Для определения толщины детали после формовки применяют индикаторные стойки. Замеры толщины проводят на каждом из шести кольцевых элементов детали в сечении противоположном стыку и многократно (6 раз) в каждом кольцевом элементе.

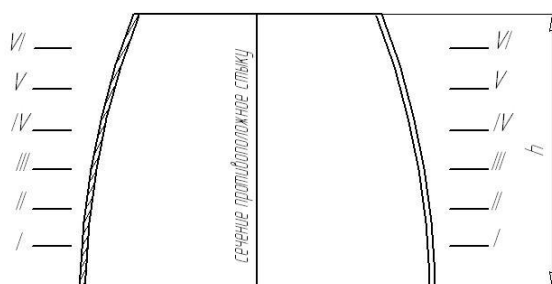


Рисунок 5 - Схема замеров детали выпуклой формы

При статистической обработке результатов эксперимента определяют среднее значение параметра и оценивают точность его вычисления. Среднее значение вычисляется по формуле:

$$S_{cp.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i ,$$

где S_i - значение толщины для i -й точки;

n - число измерений.

Для оценки случайной ошибки измерений используют величину выборочного среднеквадратичного отклонения или среднеквадратичной ошибки:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{cp})^2}{n(n-1)}}.$$

Поскольку замер толщины связан со случайными ошибками, находят абсолютную погрешность измерений (доверительный интервал). Ширину доверительного интервала Δx для математического ожидания определяют числом измерений и вычисляют по формуле:

$$\Delta x = S \cdot t,$$

где t - коэффициент Стьюдента, величина которого зависит от объема выборки n и заданной доверительной вероятности α ; $t=2,02$ при $\alpha=90\%$ и $n=6$. Заполняют таблицу замеров:

Таблица 2 - Значения толщины (мм) детали из стали 12X18H10T с использованием эластичного элемента

№ за- мера № сече- ния	1	2	3	4	5	6	Среднее значение толщины	Средне- квадрат. откл.	Ширина доверит. интерва- ла
I-I									
II-II									
III-III									
IV-IV									
V-V									
VI-VI									

10. *Определяют теоретическое значение усилия процесса формовки.*

Усилие процесса формовки деталей определяют по формуле:

$$P = \sigma_{\rho} \pi D S_{\text{дет}},$$

где D - диаметр большого основания детали.

Напряжения в меридиональном направлении σ_{ρ} вычисляют по формуле:

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

где Π - модуль упрочнения;

σ_{To} - экстраполированный предел текучести;

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

Механические свойства материала берут из таблицы 1.

11. *Разбирают штамп и вновь собирают.*

Вынимают заготовку, обрезают фланец по большому диаметру, устанавливают заготовку.

12. Проводят процесс в той же последовательности, чтобы установить усилие со стороны эластичного элемента на ту же самую глубину.

13. Определяют экспериментальное значение усилия процесса формовки.

$$P_{\text{эспер}} = P_{\text{силоизмери тела}} - P_{\text{эл.}},$$

где $P_{\text{силоизмери тела}}$ - усилие, снятое с силоизмерителя;

$P_{\text{эл.}}$ - усилие со стороны эластичного элемента.

14. Сравнивают усилия процесса формовки экспериментального и теоретического значений $P_{\text{эспер}}$ и $P_{\text{теорет.}}$.

3 Исследование процесса отбортовки из конической заготовки

Цель работы

Исследование процесса отбортовки

Задачи

1. Выявить механизм процесса и определить схему напряженно-деформированного состояния процесса отбортовки тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок.
2. Обосновать процесс отбортовки.
3. Определить основные параметры процесса:
 - 3.1 размеры заготовки;
 - 3.2 усилие процесса.

Механизм процесса отбортовки

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 актуальный способ, включающий процесс отбортовки: последовательно производят отбортовку на торце малого диаметра заготовки, а затем отбортовку элементов заготовки большего диаметра. Способ характеризуется в плоскости листа напряженным состоянием растяжения (см. рисунок 1) и реализуется с помощью устройства (см. рисунок 2).

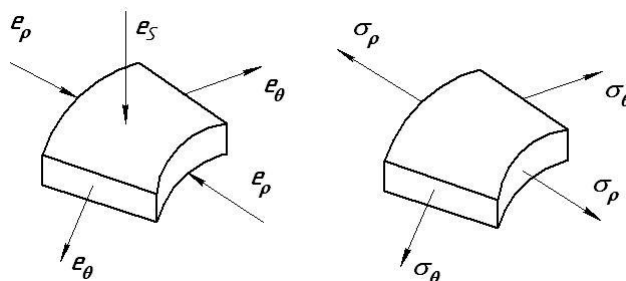
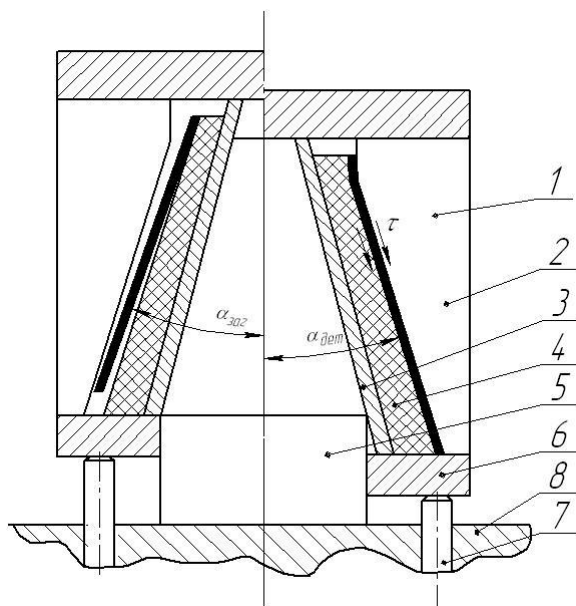


Рисунок 1- Схема всестороннего растяжения



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

Рисунок 2 - Схема формообразования для получения детали с равномерной толщиной

Обоснование процесса отбортовки

Опорное кольцо 6 поднято вверх. Матрица отведена кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки. Раздвижные секторы 3 подняты вверх вместе с эластичным элементом 4. В этом положении устанавливают конусную заготовку сверху на эластичный элемент. Элементы заготовки наименьшего и наибольшего диаметров деформируются путем отбортовки. При опускании раздвижных секторов 3 происходит увеличение диаметров эластичного элемента 4, который выполнен в виде конической оболочки постоянной толщины. Угол конусности внутренней поверхности эластичного элемента равен углу конусности конуса с направляющими пазами, а наружная поверхность меньше угла конусности образующей рабочей поверхности матрицы. Вследствие такой формы в первую очередь начинают деформироваться элементы конической заготовки меньшего диаметра. Они прижимаются к рабочей поверхности матрицы меньшего диаметра при раздаче заготовки, и при этом происходит отбортовка кромки наименьшего диаметра. Такой механизм обеспечивается благодаря тому, что угол конусности заготовки больше угла конусности эластичного элемента. Однако расстояние между заготовкой и рабочей поверхностью матрицы увеличивается по мере увеличения радиуса заготовки. При такой компоновке возникающие силы трения, действующие на заготовку, как со стороны

матрицы, так и со стороны эластичного элемента направлены в сторону наибольшего диаметра заготовки. Предложенная последовательность деформирования позволяет создавать практически одинаковые деформации элементов заготовки по толщине и получать детали различной формы: конической, выпуклой, вогнутой с равномерной толщиной стенки. Получение конической детали с высоким качеством соответствия размеров требует деформации элементов до 5-10% (это необходимо, чтобы все элементы и в зоне сварного шва продеформировались, приняв форму матрицы). В этом случае механизм процесса должен учесть то обстоятельство, что при абсолютном одинаковом увеличении диаметров заготовки величины деформаций элементов будут разными: наибольшая - для элементов зоны наименьшего диаметра, а наименьшая - в элементах зоны большего диаметра. Одинаковое перемещение в радиальном направлении объясняется работой устройства с разжимными секторами, двигаясь вниз и увеличиваясь в диаметре, они увлекают и эластичную среду, и заготовку. Можно допустить, что все элементы заготовки перемещаются параллельно оси устройства на одинаковую величину. Для того, чтобы получить деталь из заготовки, которая имеет одинаковую (равномерную) толщину, угол конусности заготовки должен быть меньше угла конусности детали. При этом элементы зоны большего диаметра получают и большее абсолютное перемещение, позволяющее приблизить величины деформаций к элементам, находящемуся в зоне малого диаметра.

Важным условием для реализации процесса является определение соотношения f и угла $\alpha_{\text{дет}}$, при каком заготовка не скользит с пуансона.

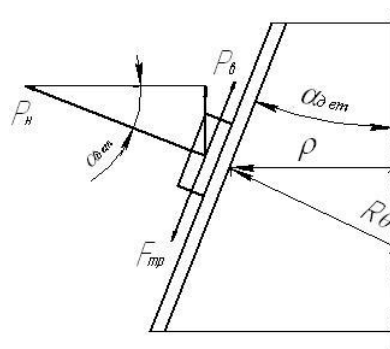


Рисунок 3 - Схема к определению условия, обеспечивающего деформацию заготовки

$$F_{\text{тр}} = P_{\text{н}} f ; \quad (1)$$

$$P_{\text{в}} = P_{\text{н}} \sin \alpha \cdot \cos \alpha_{\text{дет}} . \quad (2)$$

Из равенства формул (1) и (2) получим:

$$f \geq 0,5 \sin 2\alpha_{дет} , \quad (3)$$

где f - контактное трение заготовки;

P_n - суммарное усилие от давления, равное:

$$P_n = qF_{дет} = \frac{S_{дет} \sigma_v}{R_\theta} F_{дет} ,$$

где $F_{дет}$ - площадь детали;

$S_{дет}$ - толщина детали;

q - давление;

σ_v - прочность материала;

R_θ - средний радиус в тангенциальном направлении.

Возникновение сжимающих напряжений возможно при движении заготовки с пуансона к меньшему диаметру, если выполняется условие:

$1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{дет} \leq 0$ или $f \geq \operatorname{tg} \alpha_{дет}$. Видно, что $\sigma_\rho \leq 0$ в том случае, если

$$1 - f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{дет} \leq 0 , \text{ или} \quad (4)$$

$$f \geq \operatorname{tg} \alpha_{дет} .$$

Построим графики по формулам (4) и (3).

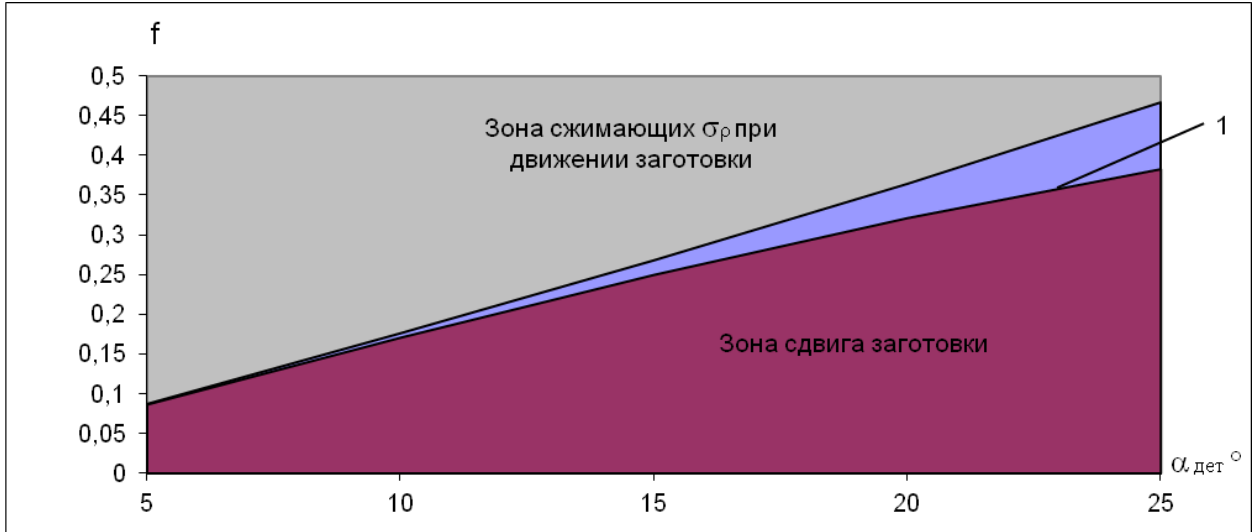


Рисунок 4 - Соотношение коэффициента трения и угла конусности, определяющих наличие сжимающих меридиональных напряжений и условия движения заготовки вниз по конусу

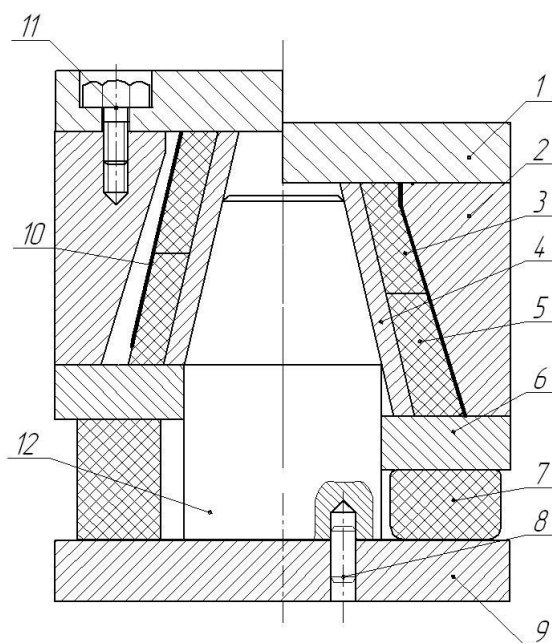
Из графика видно: если при заданной конусности заготовки коэффициент трения находится в зоне выше 1-ой кривой, то отсутствует движение заготовки в направлении меньшего диаметра. Следует отметить, что даже в случае движения в заготовке отсутствуют условия, вызывающие сжимающие меридиональные

напряжения, так как последние имеют место при больших значениях коэффициента трения.

Оборудование, оснастка, материал, инструмент

Для осуществления процесса отбортовки в лабораторных исследованиях применяют универсальную гидравлическую машину ЦДМПУ-30, с силоизмерителем до 300 кН (цена деления шкалы – 0,1 кН). Скорость перемещения траверсы 0-10 мм/сек.

В качестве оснастки используют экспериментальный штамп (см. рисунок 5).



1 - верхняя плита штампа; 2 - матрица; 3 - эластичный элемент; 4 - раздвижные сектора; 5 - эластичный элемент; 6 - опорное кольцо; 7 - буфер; 8- шпилька; 9 - нижняя плита штампа; 10 - заготовка; 11 - болт; 12 - конус

Рисунок 5 - Общий вид штампа

В штампе применяют в качестве раздвижных секторов 4 конус, разделенный на четыре части, на который устанавливается эластичный элемент постоянной толщины 3. Коническая заготовка 10, полученная из плоской заготовки в виде сегмента, согнута, сварена и установлена сверху на эластичный элемент. Угол конусности матрицы 2 несколько больше, чем угол конусности заготовки, что позволяет при формообразовании в условиях схемы линейного напряженного состояния получать одинаковые тангенциальные деформации растяжения и следовательно толщину. При

деформации эластичный элемент увеличивается в диаметре и утоняется. Однако увеличение диаметра является преобладающим, что позволяет получать практически готовую деталь по форме рабочей поверхности матрицы. Данная компоновка обеспечивается наличием буфера 7, установленным в виде эластичного кольца между опорным кольцом 6 и нижней плитой штампа 7. Поэтому усилие, необходимое для формообразования определяют, как сумму величин от усилия отбортовки конического элемента и от усилия сжатия буфера. Чтобы определить усилие отбортовки необходимо определить усилие, затраченное на преодоление сопротивления эластичному элементу, для чего штамп осаживают на ту же самую величину, что и с заготовкой, но при этом заготовка вынимается из штампа.

Процесс пластического формообразования производится до полного прилегания заготовки по всей поверхности матрицы, ограниченной размерами готовой детали. С силоизмерителя ЦДМПУ-30 снимают показание усилия процесса.

Конус, матрица, раздвижные сектора изготавливают из стали 45 (Ст 45). Остальные рабочие элементы штампа изготовлены из стали 3 (Ст 3).

Для определения величины деформации по толщине применяют мерительную скобу с индикатором часового типа. Цена деления шкалы индикатора - 0,01 мм. Для замера и нанесения линейных размеров используют штангенциркуль и штангенрейсмус с ценой деления 0,05 мм.

Материалом для заготовки выбрана сталь 12Х18Н10Т. Механические свойства и константы упрочнения материала приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Механические свойства и константы упрочнения для стали 12Х18Н10Т

Материал	δ_p	μ	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{ш}$, МПа	A , МПа	n	П , МПа	σ_{T_0} , МПа
12Х18Н10Т $S_{заг} = 0,5$ мм	0,052	0,5	272,07	430,38	452,76	719	0,16	2867,86	266,33

n , A - показатели механических свойств материала;

$\sigma_{ш}$ - напряжения в момент появления шейки;

σ_B - предел прочности;

$\sigma_{0,2}$ - условный предел текучести.

Порядок выполнения работы

Коническая заготовка (см. рисунок 6) с учетом размеров штамповой оснастки имеет размеры: $H = 77 \text{ мм}$, $D = 100 \text{ мм}$, $\alpha_{\text{заг}} = 13^\circ$, $S_{\text{заг}} = 0,5 \text{ мм}$ (размеры рассчитываются на практических занятиях и могут быть скорректированы). Недостающие размеры находят по геометрическим соотношениям, например $d = D - 2 H \operatorname{tg} \alpha_{\text{заг}}$.

1. Определяют размеры заготовки под развертку.

Для построения развертки из условия равенства длин окружностей большего и меньшего диаметров, образующей конической оболочки, длинами дуг и высотой развертки имеем (см. рисунок 6):

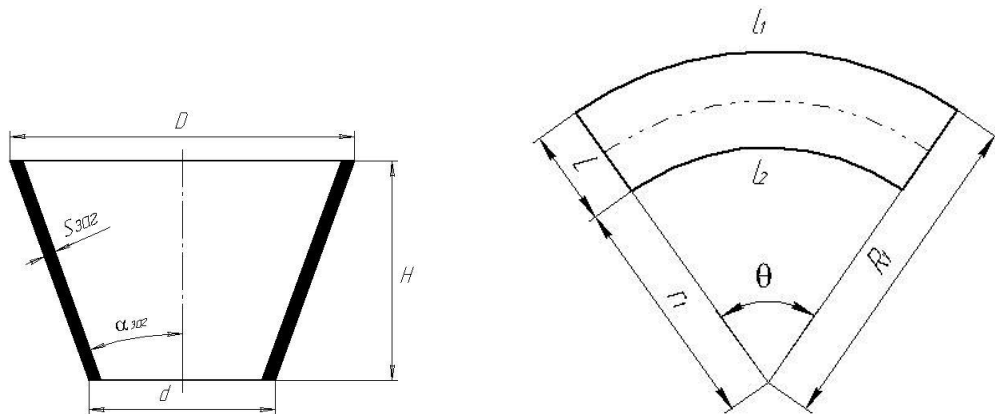


Рисунок 6 - Схема заготовки и развертки

$$R_1 - r_1 = \frac{D_3 - d_3}{2 \sin \alpha_{\text{заг}}}, \quad l_1 = \pi D_3 = R_1 \theta, \quad l_2 = \pi d_3 = r_1 \theta,$$

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;

d - диаметр меньшего основания детали;

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

d_3 - диаметр меньшего основания заготовки с учетом припуска под зажимы;

D_3 - диаметр большего основания заготовки с учетом припуска под зажимы.

Решив систему 3-х уравнений относительно R_1, r_1, θ , получим:

$$\theta = 2\pi \sin \alpha_{заг},$$

$$R_1 = \frac{l_1}{\theta},$$

$$r_1 = \frac{l_2}{\theta}.$$

2. На развертку наносят разметку для определения толщины детали, после проведенного эксперимента.
3. Сворачивают развертку на оправке.
4. Собирают штамп.

Помещают в него эластичный буфер, сверху на него укладывают подкладную плиту, на раздвижные сектора - эластичный элемент.

5. Устанавливают заготовку в штамп (заготовка укладывается на эластичный элемент).
6. Устанавливают штамповую оснастку на пресс и прикладывают усилие, соответствующее 10-15 мм величины хода.
7. Вынимают заготовку, разбирая штамп в обратном порядке.
8. Определяют усилие по силоизмерителю.
9. Замеряют толщину детали и обрабатывают результаты.

Для определения толщины детали после формовки применяют индикаторные стойки. Замеры толщины проводят на каждом из шести кольцевых элементов детали в сечении противоположном стыку и многократно (6 раз) в каждом кольцевом элементе.

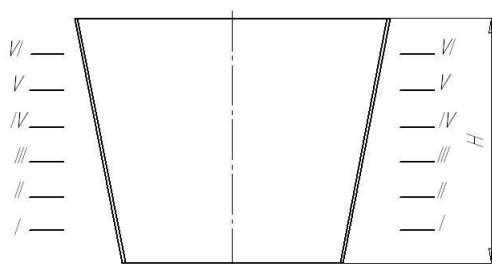


Рисунок 7 - Схема замеров детали конической формы

При статистической обработке результатов эксперимента определяют среднее значение параметра и оценивают точность его вычисления. Среднее значение вычисляется по формуле:

$$S_{cp.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i,$$

где S_i - значение толщины для i -й точки;
 n - число измерений.

Для оценки случайной ошибки измерений используют величину выборочного среднеквадратичного отклонения или среднеквадратичной ошибки:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{cp})^2}{n(n-1)}}.$$

Поскольку замер толщины связан со случайными ошибками, находят абсолютную погрешность измерений (доверительный интервал). Ширину доверительного интервала Δx для математического ожидания определяют числом измерений и вычисляют по формуле:

$$\Delta x = S \cdot t,$$

где t - коэффициент Стьюдента, величина которого зависит от объема выборки n и заданной доверительной вероятности α ; $t=2,02$ при $\alpha=90\%$ и $n=6$. Заполняют таблицу замеров:

Таблица 2 - Значения толщины (мм) детали из стали 12X18H10T

№ за- мера № сече- ния	1	2	3	4	5	6	Среднее значение толщины	Средне- квадрат. откл.	Ширина доверит. интерва- ла
I-I									
II-II									
III-III									
IV-IV									
V-V									
VI-VI									

10. *Определяют теоретическое значение усилия процесса отбортовки.*
Усилие процесса отбортовки деталей определяют по формуле:

$$P_{теорет.} = qF_{дет} = \frac{S_{дет} \sigma_{\theta cp}}{R_{\theta cp}} F_{дет} = \frac{\rho_{cp}}{\cos \alpha_{дет}},$$

где $F_{дет}$ - площадь детали;

q - давление;

$R_{\theta cp}$ - средний радиус в тангенциальном направлении;

$S_{дет}$ - толщина детали;

$\sigma_{\theta cp}$ - растягивающие напряжения в тангенциальном направлении на среднем участке детали.

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{TO} + \Pi e_{\theta cp}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ - модуль упрочнения;

$\sigma_{\text{ТО}}$ - экстраполированный предел текучести;

$e_{\theta_{\text{ср}}}$ - тангенциальная деформация на среднем участке детали.

$$e_{\theta_{\text{ср}}} \approx \left(1 - \frac{1}{\rho_{\text{ср}}} \right),$$

где $\rho_{\text{ср}}$ - средний радиус детали, замеренный на высоте $\frac{H}{2}$.

11. *Определяют экспериментальное значение усилия процесса отбортовки.*

$$P_{\text{эспер}} = P_{\text{силоизмери теля}} - P_{\text{эл.}},$$

где $P_{\text{силоизмери теля}}$ - усилие, снятое с силоизмерителя;

$P_{\text{эл.}}$ - усилие со стороны эластичного элемента.

Для определения усилия со стороны эластичного элемента:

12. *Определяют усилия деформирования эластичных элементов при закрытой высоте штампа и вынуженной заготовке.*

13. *Сравнивают усилия экспериментального и теоретического значений*

$P_{\text{эспер}}$ и $P_{\text{теорет.}}$.

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)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗ КОНИЧЕСКОЙ
ЗАГОТОВКИ

Электронные методические указания
к практическим занятиям

САМАРА 2013

УДК 662.2.8

И-88

Составители: Демьяненко Елена Геннадьевна

Попов Игорь Петрович

Исследование способа формообразования из конической заготовки
[Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к практ. занятиям / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); -сост. Е. Г. Демьяненко, И.П. Попов. - Электрон. текстовые и граф. дан. (0,66 Мбайт). - Самара, 2013.

Приведены примеры решения задач и задания по расчету технологических параметров нового способа деформирования, основанного на процессе отбортовки, реализуемого устройством с раздвижными секторами, эластичным элементом, матрицей.

Указания предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением и воздействия электромагнитных источников», изучающих дисциплину «Технологии авиационно-космического назначения с использованием новых листовых материалов» в В семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Задание 1	7
Задание 2	9
Задание 3	10

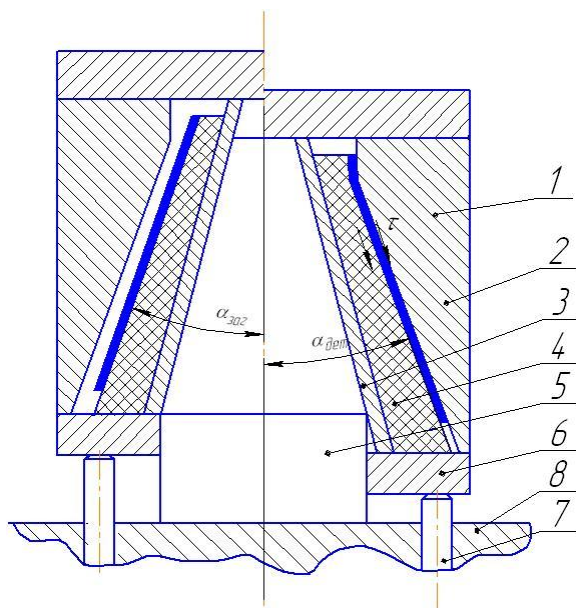
Основные условные обозначения

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_f - 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_σ - 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

Способ формообразования деталей из конической заготовки

В способе, включающем процесс отбортовки, последовательно производят отбортовку на торце малого диаметра заготовки, а затем отбортовку элементов заготовки большего диаметра. Способ реализуется с помощью устройства (см. рисунок 1) и его суть состоит в следующем.



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

Рисунок 1 - Способ формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы и устройство для его осуществления (для получения детали с равномерной толщиной)

Опорное кольцо 6 поднято вверх. Матрица отведена кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки. Раздвижные секторы 3 подняты вверх вместе с эластичным элементом 4. В этом положении устанавливают конусную заготовку сверху на эластичный элемент. Элементы заготовки наименьшего и наибольшего диаметров деформируются путем отбортовки. При опускании раздвижных секторов 3 происходит увеличение диаметров

эластичного элемента 4, который выполнен в виде конической оболочки постоянной толщины. Угол конусности внутренней поверхности эластичного элемента равен углу конусности конуса с направляющими пазами, а наружная поверхность меньше угла конусности образующей рабочей поверхности матрицы. Вследствие такой формы в первую очередь начинают деформироваться элементы конической заготовки меньшего диаметра. Они прижимаются к рабочей поверхности матрицы меньшего диаметра при раздаче заготовки, и при этом происходит отбортовка кромки наименьшего диаметра. Такой механизм обеспечивается благодаря тому, что угол конусности заготовки больше угла конусности эластичного элемента. Однако расстояние между заготовкой и рабочей поверхностью матрицы увеличивается по мере увеличения радиуса заготовки. При такой компоновке возникающие силы трения, действующие на заготовку, как со стороны матрицы, так и со стороны эластичного элемента направлены в сторону наибольшего диаметра заготовки. Предложенная последовательность деформирования позволяет создавать практически одинаковые деформации элементов заготовки по толщине и получать детали различной формы: конической, выпуклой, вогнутой с равномерной толщиной стенки. Получение конической детали с высоким качеством соответствия размеров требует деформации элементов до 5-10% (это необходимо, чтобы все элементы и в зоне сварного шва продеформировались, приняв форму матрицы). В этом случае механизм процесса должен учесть то обстоятельство, что при абсолютном одинаковом увеличении диаметров заготовки величины деформаций элементов будут разными: наибольшая - для элементов зоны наименьшего диаметра, а наименьшая - в элементах зоны большего диаметра. Одинаковое перемещение в радиальном направлении объясняется работой устройства с разжимными секторами, двигаясь вниз и увеличиваясь в диаметре, они увлекают и эластичную среду, и заготовку. Можно допустить, что все элементы заготовки перемещаются параллельно оси устройства на одинаковую величину. Для того, чтобы

получить деталь из заготовки, которая имеет одинаковую (равномерную) толщину, угол конусности заготовки должен быть меньше угла конусности детали. При этом элементы зоны большего диаметра получают и большее абсолютное перемещение, позволяющее приблизить величины деформаций к элементам, находящемуся в зоне малого диаметра.

Задание 1

Определить значения толщины конической детали с углом конусности $\alpha_{дет} = 18^\circ$, отношением большего диаметра к меньшему $\frac{D}{d} = 1,5$, с углом конусности заготовки $\alpha_{заг} = 18^\circ$, если разница в радиусах детали и заготовки постоянна при следующих значениях:

1. $\frac{R-r}{r} = \frac{\Delta}{r} = \bar{\Delta} = 0,1$, $f = 0,2$, $\mu = 0,3$;
2. $\bar{\Delta} = 0,1$, $f = 0,4$, $\mu = 0,3$;
3. $\bar{\Delta} = 0,05$, $f = 0,1$, $\mu = 0,3$.

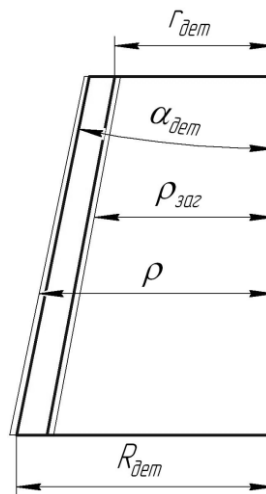


Рисунок 2 – Схема процесса к заданию

Пример: Запишем уравнение связи для первого варианта:

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

где $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r_{\text{дем}}}$; $\bar{\rho}_{\text{заг}} = \frac{\rho_{\text{заг}}}{r_{\text{дем}}}$; $\Delta = \bar{\rho} - \bar{\rho}_{\text{заг}}$;

μ - коэффициент трансверсальной анизотропии.

Соотношение напряжений определим по формуле:

$$\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} = (1 + \text{fctg } \alpha_{\text{дем}}) \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{R} \right) \quad (2)$$

Пусть ρ примет значения: $\rho = 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5$.

Данные расчёта сведём в таблицу 1.

Таблица 1 – Данные расчёта

$\bar{\rho}$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}$	0,53	0,43	0,32	0,21	0,097	0
$\frac{S_T}{S_{\text{заг}}}$	0,8	0,88	0,91	0,92	0,94	0,95

Строим график изменения толщины

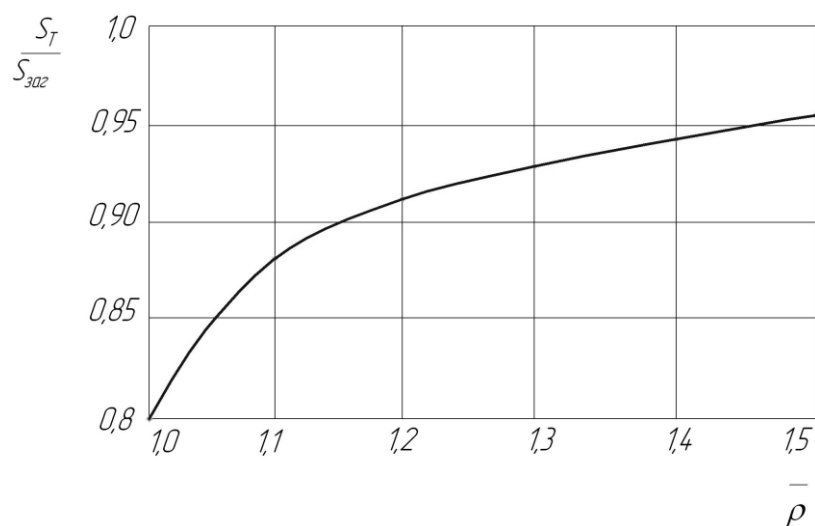


Рисунок 3 – График изменения толщин

Вывод: Относительная толщина заготовки уменьшается к меньшему основанию детали. Максимальная разнотолщинность составляет 20%.

Задание 2

Определить толщину заготовки, имеющей наименьшую разнотолщинность с деталью по условию задания 1. Условием, обеспечивающим минимальную разнотолщинность является:

$$\int_1^{\bar{R}} (S_{\partial em} - S_T)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $S_{\partial em}$ - заданная толщина детали;

S_T - технологически возможная толщина детали, получаемая при формообразовании, определяемая по формуле (1).

С учётом (1) уравнение (3) приведём к виду:

$$\int_1^{\bar{R}} \left[\bar{S}_{\partial em} - 1 + (1 - \mu) \cdot \frac{\sigma_\rho / \sigma_\theta + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_\rho / \sigma_\theta} \cdot \frac{\bar{\Delta}}{\bar{\rho} - \Delta} \right]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\text{где } \bar{S}_{\partial em} = \frac{S_{\partial em}}{S_{заг}}.$$

Условие (4) выполним при $\frac{\partial}{\partial \bar{S}_{\partial em}} = 0$:

$$\int_1^{\bar{R}} \left[\bar{S}_{\partial em} - 1 + (1 - \mu) \cdot \frac{\sigma_\rho / \sigma_\theta + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_\rho / \sigma_\theta} \cdot \frac{\bar{\Delta}}{\bar{\rho} - \Delta} \right] d\bar{\rho} = 0. \quad (5)$$

Отсюда находим:

$$\bar{S}_{\partial em} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[1 - (1 - \mu) \cdot \frac{\sigma_\rho / \sigma_\theta + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_\rho / \sigma_\theta} \cdot \frac{\bar{\Delta}}{\bar{\rho} - \Delta} \right] (\bar{\rho}_i + 1 - \bar{\rho}_i)}{\sum_{i=1}^n (\bar{\rho}_i + 1 - \bar{\rho}_i)}.$$

Для расчёта примем $n = 5, i = 1, 2, 3, 4, 5$.

Пример: $\bar{\rho}_{i+1} - \bar{\rho}_i = 0,1$ Используя данные таблицы 1, получим:

$$\bar{S}_{\partial em} = \frac{5 \cdot 0,1 - 0,7 \cdot 0,1(0,18 + 0,164 + 0,124 + 0,107 + 0,081)}{5 \cdot 0,1} = \frac{0,45}{0,5} = 0,9.$$

Вывод: При заданной толщине детали толщина заготовки будет больше в 1,11 раза.

Задание 3

Рассчитать диаметр большего основания конической заготовки для получения конической детали с наименьшей разнотолщинностью, при известной относительной разнице $\bar{\Delta}$ между диаметром детали и заготовки в зоне наименьшего диаметра. Угол конусности детали $\alpha_{дет}$, соотношение диаметров большего и меньшего основания деталей $\frac{D}{d} = \frac{R_{дет}}{r_{дет}} = q$. Рассмотреть

случаи при $\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} = 0$; $\mu = 0,3$:

1. $\bar{\Delta} = 0,1$, $\alpha_{дет} = 18^{\circ}$, $q = 1,4$;
2. $\bar{\Delta} = 0,05$, $\alpha_{дет} = 15^{\circ}$, $q = 1,3$;
3. $\bar{\Delta} = 0,08$, $\alpha_{дет} = 12^{\circ}$, $q = 1,2$;
4. $\bar{\Delta} = 0,15$, $\alpha_{дет} = 15^{\circ}$, $q = 1,5$.

Пример: Найдём толщину детали из уравнения связи напряжений и деформаций при $\frac{r_{заг} + r_{дет}}{r_{дет}} = 0,1$, когда толщина детали равна толщине кромки меньшего основания.

$$l_s = \frac{\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta} + 1}{1 - \mu \cdot \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}} \cdot (1 - \mu) \cdot l_{\theta} \quad (6)$$

$$\text{Примем } \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} = 0, \quad l_s = \frac{S_T - S_{заг}}{S_{заг}}, \quad l_{\theta} = \frac{r_{дет} - r_{заг}}{r_{дет}}.$$

Уравнение (6) запишем в виде:

$$\bar{S}_T = 1 - (1 - \mu) \left(1 - \frac{r_{заг}}{r_{дет}} \right) \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{S}_T = \frac{S_T}{S_{заг}}, \quad 1 - \frac{r_{заг}}{r_{дет}} = \bar{\Delta},$$

$$\text{Приняв } \bar{S}_T = \bar{S}_{дет} = 1 - (1 - \mu) \bar{\Delta} = 1 - 0,5 \cdot 0,1 = 0,25.$$

Примем условие, что соотношение $\frac{r_{3az}}{r_{\partial em}}$ меняется по линейному закону

с параметрами a и l .

$$\frac{r_{3az}}{r_{\partial em}} = a + l\bar{\rho} \cdot \frac{R_{\partial em}}{r_{\partial em}} \leq \bar{\rho} \leq 1 \quad (8)$$

При этом $\bar{\rho} = 1$, $\frac{r_{3az}}{r_{\partial em}} = 1 - \bar{\Delta}$.

$$\text{Отсюда } 1 - \bar{\Delta} = a + l \text{ и } 1 - \bar{\Delta} - l = a. \quad (9)$$

С учётом (9) получим, что (8) равно

$$\frac{r_{3az}}{r_{\partial em}} = 1 - \bar{\Delta} + l(\bar{\rho} - 1). \quad (10)$$

Определим параметр l , определяющий тангенс угла наклона образующей конической поверхности заготовки к её оси.

Запишем условие минимализации разнотолщинности заготовки и детали:

$$\int_1^{1,4} (\bar{S}_{\partial em} - \bar{S}_T)^2 d\bar{\rho} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Здесь $\bar{S}_{\partial em} = 95 - \text{const}$, с учётом (10)

$$\bar{S}_T = 1 - (1 - \mu) \left(1 - \frac{r_{3az}}{r_{\partial em}} \right) = 1 - (1 - \mu) [\bar{\Delta} - l(\bar{\rho} - 1)] \quad (12)$$

Интеграл примет вид:

$$\int_1^{1,4} (\bar{S}_{\partial em} - 1 + (1 - \mu) [\bar{\Delta} - l(\bar{\rho} - 1)])^2 d\bar{\rho} \rightarrow \min \quad (13)$$

Минимум найдём из условия $\frac{\partial}{\partial l} = 0$:

$$\begin{aligned} & \int_1^{1,4} (\bar{S}_{\partial em} - 1 + (1 - \mu) [\bar{\Delta} - l(\bar{\rho} - 1)]) \cdot (\bar{\rho} - 1) d\bar{\rho} = 0 \text{ или} \\ & \int_1^{1,4} ([\bar{S}_{\partial em} - 1 + (1 - \mu) \bar{\Delta}] (\bar{\rho} - 1) (\partial \bar{\rho} - 1) - l(1 - \mu)) \int_1^{1,4} (\bar{\rho} - 1)^2 \partial (\bar{\rho} - 1) = 0 \text{ или} \\ & \frac{(1,4 - 1)^2}{2} [\bar{S}_{\partial em} - 1 + (1 - \mu) \bar{\Delta}] - l(1 - \mu) \frac{(1,4 - 1)^3}{3} = 0. \end{aligned}$$

Выразим параметр l :

$$l = -0,24 \frac{\bar{S}_{дет} - 1 + (1 - \mu)\bar{\Delta}}{(1 - \mu) \cdot 0,064} = 3,75 \frac{-0,05 + 0,07}{0,7} = 0,107 \text{ .}$$

Построим график изменения толщины детали по формуле (13).

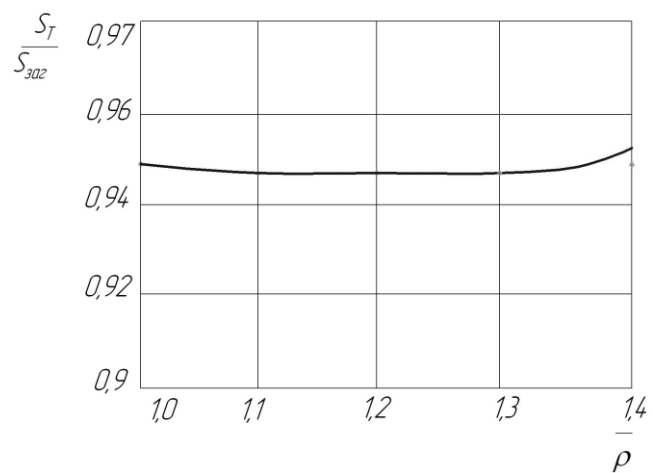


Рисунок 4 – График изменения толщины

Вывод: Угол наклона образующей заготовки, чтобы получить минимальную разнотолщинность детали, составляет около 6^0 .

Авторы: Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов

Способ формообразования тонкостенных осесимметричных деталей бочкообразной формы

Изобретение относится к холодной листовой штамповке, в частности к формообразованию тонкостенных осесимметричных оболочек, и может быть использовано при изготовлении крупногабаритных тонкостенных деталей усеченной сужающейся формы на прессах двойного действия.

Известен способ для формообразования оболочек сужающейся формы (Пат. 58055 Российская Федерация, МПК7B21D22/30, опубл. 2006, бюл. №31), в котором осуществляется деформирование путём раздачи и осевого растяжения. Заготовка не перемещается, поскольку она зафиксирована за большой торец между рабочими поверхностями матрицы и прижима. На этой стадии усилие осевого растяжения возникает лишь между пуансоном и большим торцом заготовки, поскольку её малый торец в течение стадии деформировался свободно от зажима. В тот момент, когда нижняя поверхность фланца пуансона достигает уровня дополнительных толкателей, усилие от пуансона начинает передаваться на эластичный элемент. Деформация его заключается в осадке – уменьшении высоты и увеличении широтных размеров. При этом увеличиваются и размеры самой заготовки, происходит ее выпрямление и деформация в условиях схемы напряженно-деформированного состояния, соответствующего процессу формовки. Т.е. деформирование происходит за счет утонения заготовки. Это обеспечивается тем, что длина шпильки несколько больше, чем длина рабочей части пуансона. При дальнейшем ходе пуансона в очаг деформации включается вся большая часть заготовки, и 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 и выталкивателем. С этого момента усилие растяжения вдоль образующей прикладывается к обоим торцам заготовки. Величина деформации эластичного элемента, зависит от его исходной высоты, а также от длины дополнительных толкателей, через которые усилие передаётся на эластичный элемент. Сжимаясь, уменьшается его внутренний диаметр. В результате этого заготовка прижимается к рабочей поверхности пуансона. Силы трения, возникающие между заготовкой и пуансоном, блокируют перемещение элементов заготовки, находящихся на ее меньшем основании и препятствуют утонению заготовки.

Недостаток этого способа заключается в трудности согласования внешних сил для упорядоченности необходимого усилия сжатия эластичного элемента и величины перемещения внешней силы, приложенной к нему.

Наиболее близким по технической сущности является способ (Пат. 78709 Российская Федерация, МПК7B21D20/30, опубл. 10.12.2008, бюл. № 34.) для формообразования выпуклых тонкостенных сужающихся оболочек. При движении на пуансон действует усилие, равное суммарному усилию, создаваемому выталкивателем и от давления эластичного элемента. Так как эластичный элемент находится в замкнутом объеме, то внутреннее давление в нем зависит от возможного перемещения подкладной плиты, которая создает усилие сопротивления при сжатии эластичного буфера в виде кольца. При этом пуансон, внедряясь в эластичный элемент, перемещает часть объема. Величина перемещения подкладной плиты равна величине сжатия эластичного буфера.

Недостатком этого способа являются значительные усилия процесса и невозможность получения деталей бочкообразной формы.

Задачей изобретения является получение качественной тонкостенной осесимметричной детали бочкообразной формы без огранки с минимальной разнотолщинностью за один ход пресса, повышение коэффициента использования материала.

Задача решается за счет того, что в способе формообразования тонкостенных осесимметричных деталей бочкообразной формы из цилиндрических заготовок по жесткой матрице эластичными элементами, согласно изобретению, в зоне контакта заготовки и эластичных элементов создают силы трения, направленные навстречу друг другу, при этом должно быть выполнено условие:

$$F_1 = F_2,$$

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

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

Способ реализуется с помощью устройства и поясняется чертежами.

Устройство содержит 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. Заготовка 10.

Способ осуществляют следующим образом:

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. Обязательным является условие: высота раздвижных секторов и общая высота 2-х 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, расположенных по торцам заготовки, деформирующихся идвигающихся одновременно на встречу 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 в первую очередь снизить трудоемкость, а во-вторых, значительно повысить КИМ.

На внутренней поверхности заготовки и эластичных элементов создают силы трения направленные на встречу 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.

Формула изобретения

Способ формообразования тонкостенных осесимметричных деталей бочкообразной формы, из цилиндрических заготовок по жесткой матрице эластичными элементами, отличающийся тем, что в зоне контакта заготовки и эластичных элементов создают силы трения, направленные навстречу друг другу, при этом должно быть выполнено условие:

$$F_1 = F_2,$$

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

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

