МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Расчёт технологических параметров инновационных процессов деформирования, основанных на процессах формовки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы

Электронные методические указания
к лабораторным работам

САМАРА
2012

Авторы-составители: **Попов Игорь Петрович**
Демьяненко Елена Геннадьевна

Расчёт технологических параметров инновационных процессов деформирования, основанных на процессах формовки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,41 Мбайт). авт.-сост. И. П. Попов, Е. Г. Демьяненко. - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Исследуются новые способы деформирования, основанные на процессах формовки с разжимными пуансонами и формовки совмещённой с процессами отбортовки, вытяжки для тонкостенных осесимметричных конических деталей. 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 «Инновационные технологии получения и обработки материалов с заданными свойствами» по направлению 150400.68 «Металлургия» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Технологии и оборудование инновационных процессов деформирования» в В семестре.

Подготовлены на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

Содержание

Основные условные обозначения 4

1 Исследование процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок 5

2 Исследование процесса отбортовки тонкостенных осесимметричных деталей из кольцевых заготовок 16

3 Исследование способа формообразования, основанного на процессах формовки и вытяжки 25

4 Исследование процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов 35

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, мм^3;
$F_{заг}$, $F_{дет}$ - площадь заготовки, площадь детали, мм^2;
$S_{заг}$, $S_{дет}$ - толщина заготовки, толщина детали, мм;
e_i - интенсивность деформаций;
$П$ - модуль упрочнения;
σ_S - напряжение текучести, МПа;
σ_{T_0} - экстраполированный предел текучести, МПа;
k - коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента, 1/мм;
$\sigma_в$ - предел прочности; МПа;
σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении, МПа;
σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении, МПа;
f - коэффициент трения между поверхностями матрицы и заготовки;
μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;
R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении, мм;
R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении, мм;
q - давление, создаваемое эластичным элементом, МПа;
e_S - деформация по толщине;
e_ρ - деформация в меридиональном направлении;
e_θ - деформация в тангенциальном направлении;
b - коэффициент утонения материала;
n, A - показатели механических свойств материала;
$\sigma_ш$ - напряжения в момент появления шейки, МПа;
$d_з$ - диаметр меньшего основания заготовки с учетом припуска под зажимы, мм;
$D_з$ - диаметр большего основания заготовки с учетом припуска под зажимы, мм.

1 Исследование процесса 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 процесса формовки.
3. Определить основные параметры процесса:

3.1 размеры заготовки;

3.2 усилие процесса.

Механизм процесса формовки

В производстве изделий ракетно-космической техники находят применение достаточно глубокие ($\frac{H}{D} \rangle 0,5$), крупно-габаритные, тонкостенные ($\frac{S_{заг}}{D} \le 0,008$) осесимметричные оболочки 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.

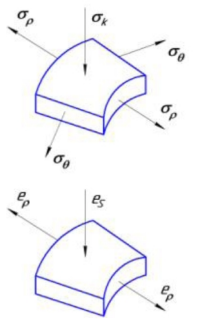


Рисунок 1- Схема всестороннего растяжения

Требования высокого качества (форма и геометрические размеры) удовлетворяются применением операции термофиксации для контура полуфабриката, полученного после формообразования. На рисунке 1 показана схема всестороннего растяжения заготовки, которая реализуется в устройстве, представленном на рисунке 2.

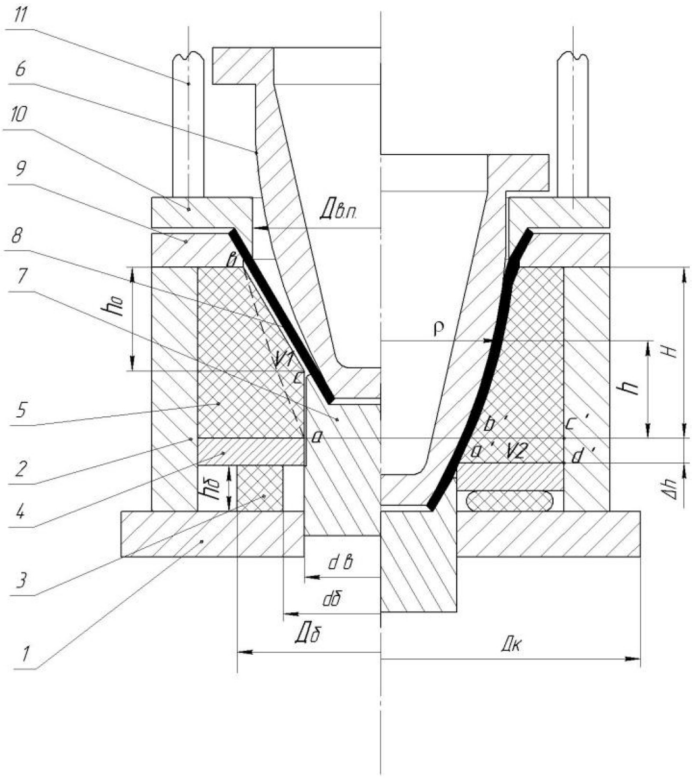


Рисунок 2- Устройство для формообразования (слева от оси в открытом, а справа от оси в закрытом положении)

Устройство предназначено для промышленного гидравлического пресса двойного действия с гидроподушкой типа П233 и состоит из (Пат. 78709 Российская Федерация, МПК[7]B21D20/30; Пат. 58055 Российская Федерация, МПК[7]B21D22/30; Пат. 102543 Российская Федерация, МПК[7]B21D22/30) плиты штампа 1, на которую устанавливается контейнер 2. Внутри контейнера находятся эластичный буфер 3, установленный на плиту штампа 1, подкладная плита 4, эластичный элемент 5. На плиту штампа 1 устанавливают эластичный буфер 3, а сверху на него укладывают подкладную плиту 4 и эластичный элемент 5. Пуансон 6 и выталкиватель 7 движутся внутри контейнера, зажимая меньший диаметр конической усеченной заготовки 8. Сверху на контейнер устанавливают матрицу 9, к которой прижимом 10 прижимается верхняя часть усечённого конуса заготовки 8. Усилие прижима 10 передают с помощью шпильки 11.

Обоснование процесса формовки

Коническая усеченная заготовка 8 устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 9, а прилегающие к торцу меньшего основания, на выталкиватель 7. Затем заготовка зажимается по внутренним поверхностям к матрице 9 прижимом 10, а к выталкивателю 7 пуансоном 6. Инструмент, где происходит зажим заготовки, выполнен с рабочими поверхностями, имеющими конусность, совпадающей с конусностью заготовки. При движении на пуансон действует усилие, равное суммарному усилию, создаваемое выталкивателем и усилием от давления эластичного элемента 5. Так как эластичный элемент находится в замкнутом объеме, то внутреннее давление в нем зависит от возможного перемещения подкладной плиты 4, которая создает усилие сопротивления при сжатии эластичного буфера 3 в виде кольца. При этом пуансон, внедряясь в эластичный элемент 5, 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. Объем V_2 имеет в сечении фигуру прямоугольника $a'b'c'd'$ и равен:

$$V_2 = \frac{\pi\left(D_k^2 - d_в^2\right)}{4}\Delta h, \qquad (1)$$

где $D_k, d_в$ - соответственно диаметры контейнера и выталкивателя;

Δh - высота перемещенного смещенного объема.

Объем смещенной части эластичного наполнителя:

$$V_1 = V_{бк} - V_{цил} - V_{мк}. \qquad (2)$$

Объем большого усеченного конуса:

$$V_{бк} = \frac{\pi}{12}H\left(D_{вп}^2 + D_{вп}d_в + d_в^2\right);$$

Объем цилиндра:

$$V_{цил} = \frac{\pi}{4}d_в^2\left(H - h_0\right);$$

Объем малого усеченного конуса:

$$V_{мк} = \frac{\pi}{12}h_0\left(D_{вп}^2 + D_{вп}d_в + d_в^2\right);$$

$$V_1 = \frac{\pi}{12}\left(H - h_0\right)\left[\left(D_{вп}^2 + D_{вп}d_в + d_в^2\right) - 3d_в^2\right], \qquad (3)$$

где $D_{вп}, d_в$ - соответственно диаметр верхнего прижима и диаметр выталкивателя;

H - высота детали;

h_0 - высота усеченного конуса.

В случае рассмотрения не усеченного конуса, а детали сложной формы $V_{бк}$ рассчитывается по формуле:

$$V_{бк} = \pi \int_0^{H+\Delta h} \rho^2 dh, \tag{4}$$

где $\rho = f(h)$ - заданная функция зависимости радиуса наружной поверхности детали от высоты.

Из условия равенства формул (1) и (3) находим:

$$\Delta h = \frac{4V_1}{\pi\left(D_k^2 - d_в^2\right)}. \tag{5}$$

Величина перемещения подкладной плиты равна величине сжатия эластичного буфера 2. Зная необходимое давление и величину активных касательных напряжений τ на поверхности контакта заготовки с пуансоном, которые находят из решения задачи о возможном обрыве или условии заданного распределения толщины детали. Находят усилие, действующее на подкладную плиту, приняв во внимание, что давление эластичного наполнителя в замкнутом объеме распространяется одинаково во всех направлениях. Из условия равенства усилий как со стороны эластичного наполнителя, так и со стороны эластичного буфера имеем

$$\frac{\pi\left(D_к^2 - d_в^2\right)}{4} q_э = \frac{\pi\left(D_б^2 - d_б^2\right)}{4} q_б, \tag{6}$$

где $q_э, q_б$ - соответственно давления эластичного наполнителя и эластичного буфера;

$D_б = (0.75 - 0.8)D_k$ - наружный диаметр эластичного буфера;

$d_в = (0.75 - 0.8)d_б$ - внутренний диаметр эластичного буфера.

Эти соотношения диаметров берутся из условия, чтобы при сжатии эластичного буфера до 30% оставалось свободное пространство между подкладной плитой 4, плитой штампа 1, контейнером 3 и выталкивателем 6. Это исключает быстрый износ эластичного буфера и предохраняет от разрушения контейнера при высоких давлениях, в случае ошибки при регулировке хода пуансона. Из выражения (6) находим:

$$q_б = q_э \frac{D_k^2 - d_в^2}{D_б^2 - d_б^2}. \tag{7}$$

По номограмме (В.П. Романовский. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971, 644-645 с.) с учетом найденного значения $q_б$, находятся геометрические соотношения для применяемого материала

эластичного буфера, а именно, $\frac{D_б - d_б}{h_б}$, (где $h_б$ - высота эластичного буфера), а так же величину деформации сжатия эластичного буфера $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_б}$. Величина деформации сжатия дает возможность определить высоту эластичного буфера с учетом зависимости 5:

$$h_б = \frac{\Delta h}{\varepsilon}. \qquad (8)$$

Последнее выражение позволяет найти разницу диаметров:

$$D_б - d_б = \frac{\Delta h}{\varepsilon} \qquad (9)$$

или

$$(0{,}15 - 0{,}8)D_k - (1.15 - 1.2)d_в = \frac{\Delta h}{\varepsilon}.$$

Диаметр выталкивателя определен геометрией детали и длиной захвата (10-15) толщин, то находится диаметр контейнера:

$$D_k = \frac{\frac{\Delta h}{\varepsilon} + (1.15 - 1.2)d_в}{(0.75 - 0.8)}. \qquad (10)$$

Пластическая деформация заготовки происходит в условиях плоского растяжения и значительных активных сил трения, между пуансоном и заготовкой. Процесс пластического формообразования производится до полного прилегания заготовки по всей поверхности пуансона, формирующей размеры готовой детали, и ограничен величиной утонения заготовки в зоне опасного сечения наименьшего диаметра. На поверхности контакта эластичного элемента и заготовки действуют реактивные силы трения, так как перемещение эластичного элемента отстает от заготовки. Создание активных сил трения на рассматриваемой поверхности, когда перемещение эластичного элемента опережает перемещение заготовки, возможно при относительно малых объемах эластичного элемента. Однако при этом, отношение вытесненного объема V_1 к объему всего эластичного элемента превышает допустимый предел его деформирования: 25-30%. На поверхности контакта пуансона и заготовки действуют активные силы трения, которые перераспределяют напряжения в меридиональном направлении σ_ρ, уменьшая их в зоне наименьшего диаметра и увеличивая в зоне наибольшего диаметра. При этом можно считать, что напряжения σ_ρ вдоль образующей становятся постоянными и вычисляются по формуле:

$$\sigma_\rho = \frac{\sigma_{To}}{\sqrt{1-\mu^2}} + \frac{П}{1-\mu^2}\left(\frac{S_{заг} - S_{дет}}{S_{заг}}\right), \qquad (11)$$

где $П$ - модуль упрочнения;

σ_{To} - экстраполированный предел текучести;

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

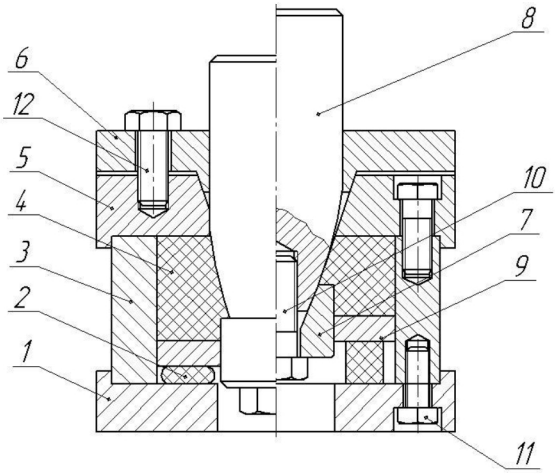
Оборудование, оснастка, материал, инструмент

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 $\frac{S_{заг}}{D} \langle 0{,}008$.



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 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); эластичный элемент - из резины, твердость которой составляет 50 (модуль упругости Е=30 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 12Х18Н10Т. Механические свойства и константами упрочнения материала приведены в таблице 1.

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

Материал	$\delta_р$	μ	$\sigma_{0,2}$, *МПа*	$\sigma_в$, *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;

$\sigma_в$ - предел прочности;

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

Порядок выполнения работы

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

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):

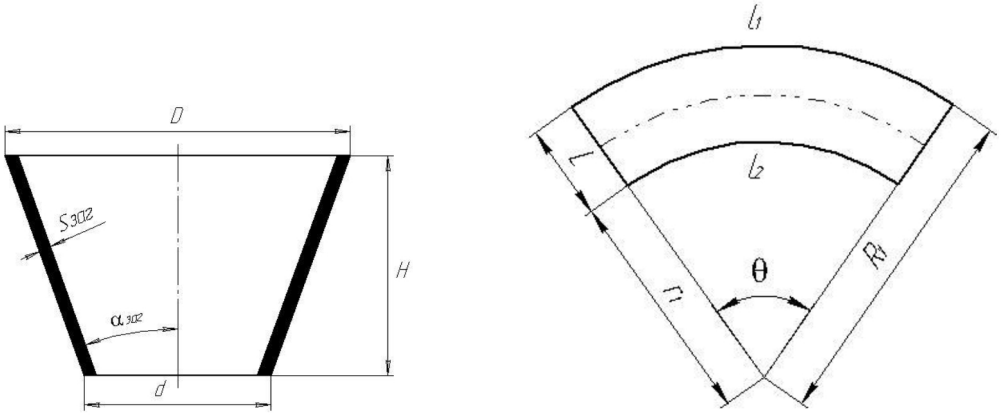


Рисунок 4 - Схема заготовки и развертки

$$R_1 - r_1 = \frac{D_з - d_з}{2\sin\alpha_{заг}},\ l_1 = \pi D_з = R_1\theta,\ l_2 = \pi d_з = r_1\theta,$$

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;

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

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

Размеры заготовки по меньшему диаметру $d_з$ и большему диаметру $D_з$ находятся с учетом припуска под зажимы:

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

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.

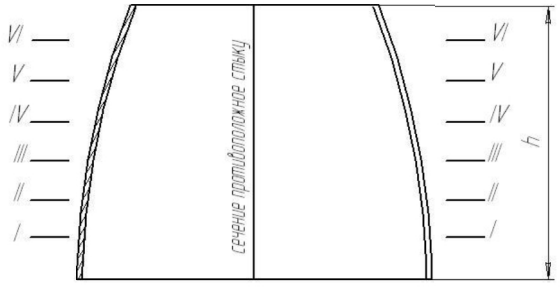


Рисунок 5 - Схема замеров детали выпуклой формы

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

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

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:

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

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 α =90% и n =6. Заполняют таблицу замеров:

Таблица 2 - Значения толщины (мм) детали из стали 12Х18Н10Т с использованием эластичного элемента

№ замера / № сечения	1	2	3	4	5	6	Среднее значение толщины	Среднеквадрат. откл.	Ширина доверит. интервала
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:

$$P = \sigma_\rho \pi D S_{дет} ,$$

где D - диаметр большего основания детали.

Напряжения в меридиональном направлении σ_ρ вычисляют по формуле (11).

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 туже самую глубину.

13. Определяют экспериментальное значение усилия процесса формовки.

$$P_{эспер} = P_{силоизмерителя} - P_{эл.},$$

где $P_{силоизмерителя}$ - усилие, снятое с силоизмерителя;

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

14. Сравнивают усилие процесса формовки экспериментального и теоретического значений.

2 Исследование процесса отбортовки тонкостенных осесимметричных деталей из кольцевых заготовок

Цель работы

Исследование процесса отбортовки из кольцевой заготовки

Задачи

4. Выявить механизм процесса и определить схему напряженно-деформированного состояния процесса отбортовки тонкостенных осесимметричных деталей из кольцевых заготовок.
5. Обосновать процесс отбортовки.
6. Определить основные параметры процесса:

3.1 $k_{пред}$ - предельный коэффициент отбортовки;

3.2 максимальную относительную высоту;

3.3 толщину заготовки.

Механизм процесса отбортовки

Потребность в тонкостенных осесимметричных деталях усеченной сужающейся формы, наряду с предъявляемыми к ним высокими требованиями по точности геометрической формы, диаметральным размерам, толщине стенки, качеству поверхности и механическим свойствам, связанными с обеспечением надежности эксплуатации деталей в условиях агрессивной среды, высоких температур и давлений, определяет необходимость совершенствования способов их изготовления. Развитие аэрокосмической техники приводит к необходимости производства подобных 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 линейного растяжения (см. рисунок 1).

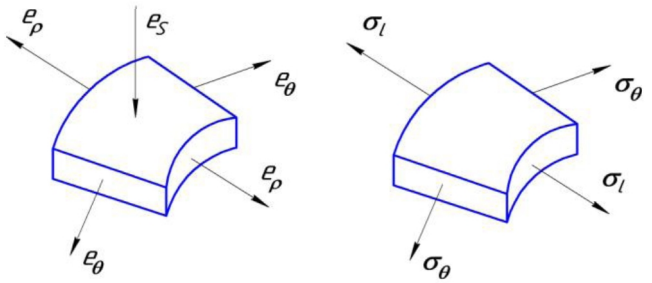


Рисунок 1- Схема напряженно-деформируемого состояния плоского растяжения

Процесс реализуется коническим пуансоном, из плоской заготовки, фланец которой жестко зажат по периферийной части между матрицей и прижимом (см. рисунок 2). Характеризуется процесс коэффициентом отбортовки: $k_{отб} = \frac{d}{d_1}$, где d - меньший диаметр детали; d_1 - диаметр отверстия в заготовке. Предельные коэффициенты определяются возможностью разрыва кромки или допустимой величиной утонения. Толщина элементов детали, расположенных в зоне наибольшего диаметра, равна толщине заготовки, а толщина элементов на кромке меньшего диаметра определяется из условия линейного растяжения:

$$S_{кр} = S_{заг}\sqrt{\frac{1}{k_{отб}}}. \qquad (1)$$

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

$$\psi = e_{кр} = \frac{-F_0 + F}{F_0} = \frac{-\pi d_1 S_{заг} + \pi d \ \ S_{кр}}{\pi d_1 S_{заг}}. \qquad (2)$$

Учитывая соотношения (1) и (2) имеем:

$$\psi = \sqrt{\frac{d}{d_1}} - 1 = \sqrt{k_{отб}} - 1.$$

Полученная зависимость позволяет определить предельный коэффициент отбортовки при условии $\psi = \psi_\delta$:

$$k_{пред} \le \frac{d}{d_1} = (\psi_\delta + 1)^2, \qquad (3)$$

где $\psi_ш$ - относительное сужение в момент образования шейки.

Обоснование процесса отбортовки

Используя метод последовательного приближения, суть которого состоит в нахождении закона изменения толщины между двумя приближенными функциями, проведем анализ для установления закона распределения толщины вдоль образующей детали. 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.

В качестве первого приближения можно взять функцию распределения толщины:

$$S_1 = a + b\rho \tag{4}$$

где a и b -const.

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

$$a = S_{заг} + \left(\frac{S_{заг}\sqrt{\frac{1}{k_{отб}}} - S_{заг}}{R - r_{кр}} \right) R, \quad b = -\frac{S_{заг}\sqrt{\frac{1}{k_{отб}}} - S_{заг}}{R - r_{кр}}. \tag{5}$$

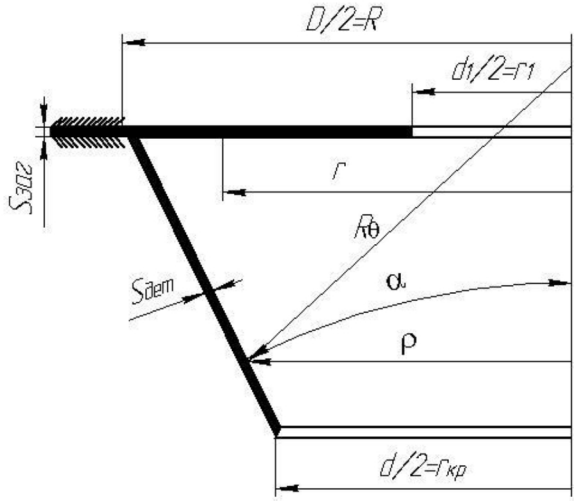
Значения толщины $S_{дет}$ во втором приближении найдем из уравнения связи напряжений и деформаций:

$$S_2 = S_{заг}\left(\frac{\rho}{r}\right)^{-\frac{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}+1}{2-\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}}}, \tag{6}$$

где r и ρ - координаты (см. рисунок 2);

σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении.



ρ - координата элемента на детали; R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении; α - угол между осью и образующей полученной детали; $S_{дет}$ - толщина детали вдоль образующей; $S_{заг}$ - толщина заготовки; D - больший диаметр детали; d - меньший диаметр детали; d_1 - диаметр отверстия в заготовке; $r_{кр}$ - радиус кромки

Рисунок 2 - Схема для определения соотношения координат элементов заготовки и детали

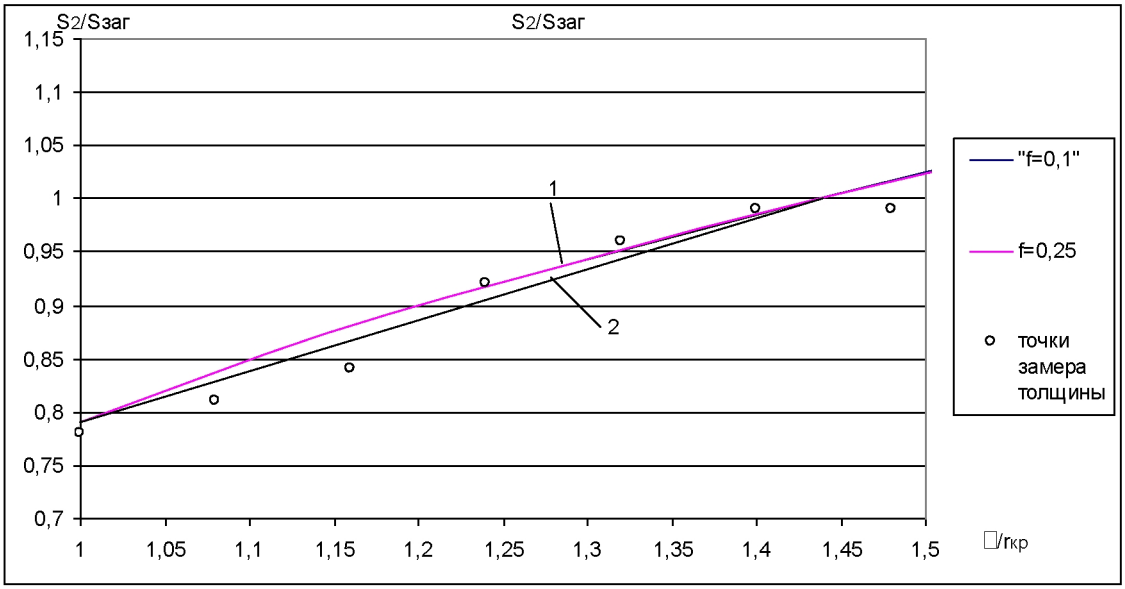
Координата на элементе заготовки определяется выражением с учетом условия постоянства объема металла заготовки и детали; функции распределения изменения толщины детали в первом приближении:

$$r = \sqrt{-\frac{S_{заг} + a + b\rho}{2 S_{заг}} \cdot \frac{R^2 - \rho^2}{\sin\alpha} + R^2}\,. \qquad (7)$$

Напряжения в меридиональном направлении с учетом принятых допущений, условия пластичности ($\sigma_\theta = \sigma_S$) и согласно рисунку 2 ($\sigma_\rho / R_\rho = \infty, R_\theta = \rho / \cos\alpha$) определяются формулой:

$$\sigma_\rho = \sigma_S \left\{ \frac{a}{(a+b\rho)(1 - f\,ctg\alpha)} + \frac{b\rho}{(2 - f\,ctg\alpha)(a+b\rho)} - \left(\frac{r_{кр}}{\rho}\right)^{1 - f\,ctg\alpha} \times \right.$$
$$\left. \times \left(\frac{a + b\,r_{кр}}{(a+b\rho)}\right)\left(\frac{a}{(1 - f\,ctg\alpha)(a + b\,r_{кр})} + \frac{b\,r_{кр}}{(2 - f\,ctg\alpha)(a + b\,r_{кр})}\right)\right\} \qquad (8)$$

Найденное значение напряжения, позволяет определить толщину детали во втором приближении и убедиться в линейном характере ее изменения при отбортовке.



1 - расчетная кривая; 2 – функция 1-го приближения

Рисунок 3 - График зависимости $S_2/S_{заг}$ от ρ/r

Используя геометрические соотношения (см. рисунок 2), условие постоянства объема металла заготовки и детали, находим:

$$\sin\alpha = \frac{\left[\left(\frac{D}{d_1}\right)^2 - \left(\frac{S_{заг}}{S_{кр}}\right)^4\right]\left(1+\frac{S_{кр}}{S_{заг}}\right)}{2\left[\left(\frac{D}{d_1}\right)^2 - 1\right]}, \qquad (9)$$

$$\frac{H}{D} = \frac{\left[\left(\frac{D}{d_1}\right)^2 - 1\right]\cos\{\arcsin\alpha\}}{\left[\frac{D}{d_1} + \left(\frac{S_{заг}}{S_{кр}}\right)^2\right]\left(1+\frac{S_{кр}}{S_{заг}}\right)\frac{D}{d_1}}, \qquad (10)$$

где H - высота детали.

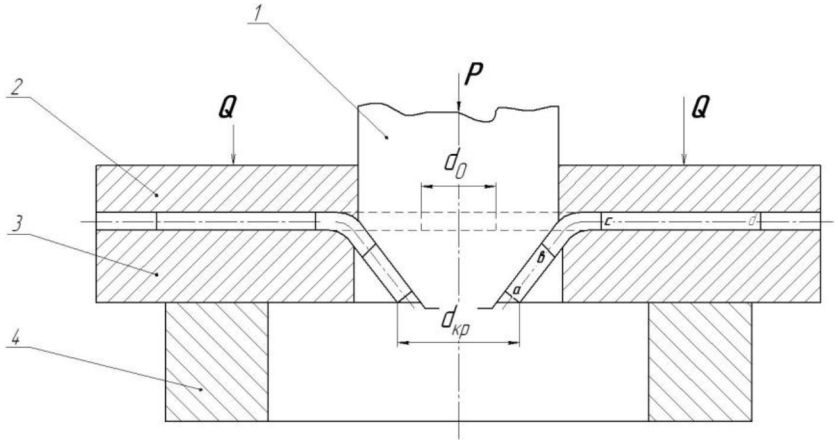
Отношение $\frac{H}{D}$ дает возможность выявить наибольшую относительную высоту конических деталей в процессах отбортовки.

Оборудование, оснастка, материал, инструмент

Для осуществления процесса отбортовкив 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 4).



1 - пуансон; 2 - прижим; 3 - матрица; 4 – подкладное кольцо

Рисунок 4 - Общий вид штампа

Штамп состоит из подкладного кольца 4, находящемся на гидропрессе. На него размещают прижим 2 и матрица 3, которые соединены между собой винтами. Заготовку укладывают между прижимом и матрицей. Пуансон устанавливают в отверстие прижима, и производят отбортовку до полного соприкосновения заготовки с рабочей конической поверхностью.

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

Материалом для заготовки выбран алюминий АД1. Механические свойства и константами упрочнения исследуемого материала приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Механические свойства и константы упрочнения для алюминия АД1

Материал	$\delta_р$	μ	$\sigma_{0,2}$, *МПа*	$\sigma_в$, *МПа*	$\sigma_ш$, *МПа*	A, *МПа*	n	П, *МПа*	σ_{T_0}, *МПа*
АД1 $S_{заг} = 0,345$ мм	0,215	0,5	44,76	77,92	94,67	121	0,16	362,11	44,03

n, A - показатели механических свойств материала;

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

$\sigma_{в}$ - предел прочности;

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

Порядок выполнения работы

Кольцевая заготовка с учетом размеров штамповой оснастки имеет размеры: $D = 180\,мм; d_1 \quad D = 30\,мм; S_{заг} = 0{,}345\,мм$ (размеры рассчитываются на практических занятиях и могут быть скорректированы).

1. *Устанавливают штамп и проводят процесс отбортовки.*
2. *Заготовку вынимают.*
3. *Замеряют толщину детали и обрабатывают результаты.*

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

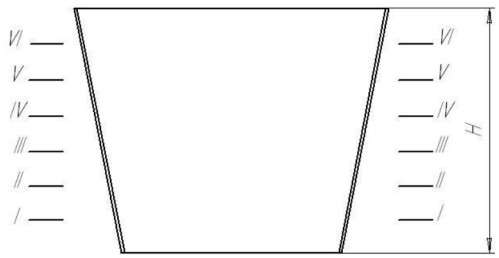


Рисунок 5 - Схема замеров детали конической формы

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

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

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:

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

Поскольку замер толщины связан со случайными ошибками, находят

абсолютную погрешность измерений (доверительный интервал). Ширину доверительного интервала Δx для математического ожидания определяют числом измерений и вычисляется 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 α=90% и n=6. Заполняют таблицу замеров:

Таблица 2 - Значения толщины (мм) детали из алюминия АД1

№ замера / № сечения	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									

Делают вывод о характере изменения толщины вдоль образующей.

4. *Рассчитывают коэффициент отбортовки и толщину кромки.*

Используют формулу: $k_{отб} = \frac{d}{d_1}$ (см.рисунок 2) и (1). Сравнивают результат с замеренной толщиной детали на кромке из таблицы 2, сечение I-I.

5. *Определяют теоретические значения толщин детали вдоль образующей.*

Замеряют в каждом из шести сечений радиус ρ и рассчитывают толщину детали:

- в первом приближении, используя формулы (4,5);
- во втором приближении, используя формулы (4,5,6,7,8,9).

Таблица 3 – Теоретические значения толщины (мм) детали

№ замера / № сечения	ρ, мм	S_1, мм	S_2, мм
I-I			
II-II			
III-III			
IV-IV			
V-V			
VI-VI			

6. *Строят график:* зависимость распределения теоретических значений толщин (таблица 3) второго приближения S_2 вдоль образующей и сравнивают с экспериментальными данными при одной и той же координате ρ в шести сечениях. Находят относительное отклонение по формуле в каждом сечении: $\frac{S_2 - S_{эксперим}}{S_{эксперим}} \cdot 100\,\%$.

7. *Определяют значение предельного коэффициента отбортовки.*

Используют формулу (3) и зависимость: $\psi_ш = \frac{\delta_p}{1+\delta_p}$, где величина δ_p берется по данным таблицы 1.

8. *Определяют относительную высоту детали по формуле* (10).

3 Исследование способа формообразования, основанного на процессах формовки и вытяжки

Цель работы

Исследование способа формообразования, основанного на процессах формовки и вытяжки

Задачи

1. Выявить механизм способа формообразования тонкостенных осесимметричных деталей, основанного на процессах формовки, вытяжки и определить схему напряженно-деформированного состояния участков заготовки.
2. Обосновать способ формообразования, основанный на процессах формовки и вытяжки.
3. Определить основные параметры процесса:

3.1 размеры заготовки;

3.2 усилие процесса;

3.3 геометрию штамповой оснастки.

Механизм способа формообразования, основанного на процессах формовки и вытяжки

Известно, что тонкостенные осесимметричные детали усеченной сужающейся формы, для которых при формообразовании требуется условие плоского напряжённого состояния растяжения (см. рисунок 1), соответствующего процессу формовки, могут быть получены с относительной высотой $\frac{H}{D} \le 0{,}33$ (и для высокопластичных материалов).

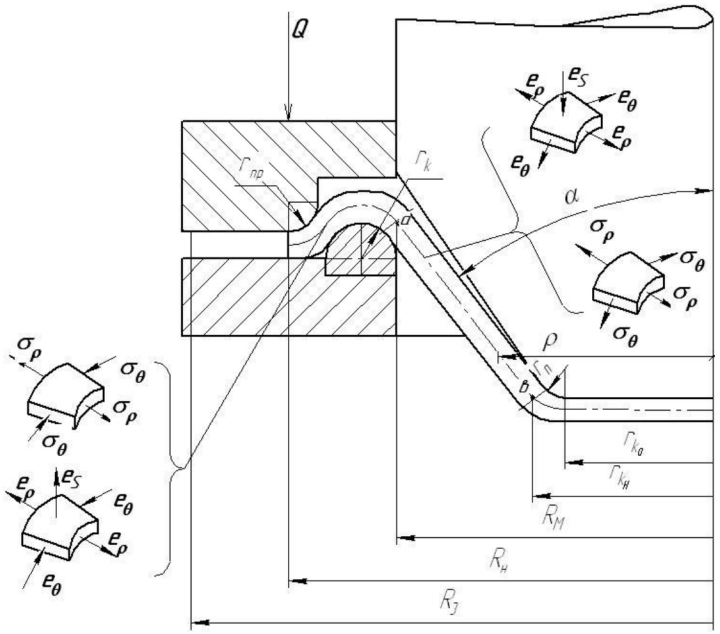


Рисунок 1- Схема формовки-вытяжки

Способ формообразования, основанный на процессах формовки и вытяжки, позволяет увеличить относительную высоту детали. Это возможно, когда очаг деформации процесса формовки донного и конического участков снабжается дополнительным материалом со стороны сильно прижатого фланца. Условие формовки и устранение гофр на коническом свободном участке, выполняется, если в точке «а» (в зоне касания заготовки) меридиональные напряжения σ_ρ будут равны пределу текучести. Тогда тангенциальные напряжения $\sigma_\theta = 0$ (т.е. меняется знак сжатия при вытяжке на знак растяжения при формовке). Это достигается конструктивно: применением перетяжного порога. Такая схема реализует максимальные напряжения σ_ρ в точке касания «а» при минимальном значении усилия прижима и минимальных размерах фланца заготовки за счет изгиба трения на пороге, упрочненной и утолщенной заготовки. Важен момент, когда кромка заготовки $R_н$ достигнув радиуса закругления прижима $r_{пр}$, обеспечивает в течение всего процесса вытяжки максимальные напряжения σ_ρ в точке касания «а», равные пределу текучести, но уже упрочненных элементов. Для этого необходим расчет размеров заготовки.

В этом случае можно считать, что объем фланца заготовки, находящейся между радиусами $R_з$ и $R_н$, будет дополнительным для формирования конической детали. Благодаря чему появляется возможность увеличения ее высоты. Внимание необходимо обратить на то обстоятельство, чтобы на

заключительной стадии (при σ_ρ - max) меридиональные напряжения σ_ρ в точке касания «а» не превышали некоторого значения предела текучести, во избежании обрыва в донной части заготовки при формовке. Т.е. напряжения в радиусной части пуансона не должны превысить предельного значения - напряжения разрыва.

Обоснование способа формообразования, основанного на процессах формовки и вытяжки

Условие формовки и устранение гофр на коническом свободном участке имеет место, если в точке «а» (в зоне касания заготовки) тангенциальное напряжение $\sigma_\theta = 0$, (т.е. меняется знак сжатия при вытяжке на знак растяжения при формовке). Найдём напряжение, возникающее от процесса вытяжки в соответствии с методикой (предложенной Е.А. Поповым):

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

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

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

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

$R_м$ - радиус отверстия в матрице;

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

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

f - коэффициент трения;

α - угол конусности детали;

Q - усилие прижима;

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

$S_{заг}$ - толщина заготовки;

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

$R_н$ - радиус кромки заготовки на заключительной стадии.

Для трансверсальной анизотропии приведённый коэффициент Лоде найдём из условия:

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

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

где μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

Анализ выражения (1) показывает, что оно имеет экстремум от переменной, которой является перемещение X. С ростом X увеличивается напряжение от упрочнения $\left(\sigma_{T_0} + ПX\right)$, но одновременно уменьшаются размеры фланца - X.

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

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

(3)

где $\bar{\sigma}_{\rho_a} = \dfrac{\sigma_{\rho_a}}{П}$; $\bar{\sigma}_{T_0} = \dfrac{\sigma_T}{П}$. Представим (3) в виде:

$$\underbrace{-Xe^{0{,}5f\pi} + \left[\ln\left|K_в\right| - X + \frac{1}{2\bar{r}_{пр}+1} + \frac{Q\cdot f}{\pi S_{заг} R_з}\right] e^{0{,}5f\pi} + \frac{1}{2\bar{r}_к+1} - \bar{\sigma}_{T_0} e^{0{,}5f\pi} - Xe^{0{,}5f\pi}}_{a} = 0. \qquad (4)$$

Чтобы выполнить условие в точке «а»: $\sigma_\theta = 0$; из условия пластичности: $\sigma_{\rho_a} - \sigma_{\theta_a} = \sigma_{S_a}$, выражение (1) необходимо приравнять пределу текучести:

$$\sigma_{\rho_a} = \sigma_{S_a} = \beta\left(\sigma_{T_0} + П\bar{X}\right). \qquad (5)$$

Из выражения (1) получим:

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

(6)

Подставим (6) в (4) и после преобразований имеем:

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

Далее определим перемещение «а»:

$$\bar{X} = -\bar{\sigma}_{T_0} + \exp\left[f\left(\alpha - 1{,}5\pi\right)\right]. \qquad (7)$$

Приняв: $r_к = r_{пр}$:

$$R_н = R_м + 2r_к + r_{пр} = R_м + 3r_{пр}. \quad (8)$$

Из выражения (7), (8) находим радиус заготовки:

$$R_з = \frac{R_н}{1-\overline{X}} = \frac{R_м + 3r_{пр}}{1-\overline{X}}. \quad (9)$$

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

Необходимо иметь ввиду, что выражение (5) не должно превышать некоторого значения предела текучести в точке «а», во избежании обрыва в донной части заготовки при формовке. Для этого рассмотрим процесс формовки. Уравнение равновесия в постоянной системе координат запишем:

$$\overline{\rho}\frac{d\sigma_\rho}{d\overline{\rho}} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0, \quad (10)$$

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

Энергетическое условие пластичности для трансверсально-анизотропного тела:

$$\sigma_S^2 = \sigma_\rho^2 - 2\mu\sigma_\rho\sigma_\theta + \sigma_\theta^2. \quad (11)$$

Отсюда:

$$\sigma_\theta = \mu\sigma_\rho + \sqrt{\sigma_S^2 - (1-\mu^2)\sigma_\rho^2}. \quad (12)$$

Ищем решение уравнения (10) в виде ряда Тейлора в точке «а»:

$$\sigma_\rho = \sigma_{\rho_a} + \sigma'_{\rho_a}(\overline{\rho}-1) + \frac{1}{2}\sigma''_{\rho_a}(\overline{\rho}-1)^2, \quad (13)$$

при $r_{кн} \le \overline{\rho} \le 1$, $\overline{\rho} = \frac{\rho}{R_м}$; $\sigma_{\rho_a} = \sigma_{S_a}$; $\sigma_{\theta_a} = 0$. Коэффициент σ'_{ρ_a} находим из (10) при $\overline{\rho} = \frac{\rho}{R_м} = 1$:

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

Решение (13) примет вид с двумя членами ряда:

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

Решение (13) примет вид с тремя членами ряда:

$$\sigma_\rho = \sigma_{S_a} - \sigma_{S_a}(\overline{\rho}-1) - \frac{1}{2}\sigma_{S_a}(\overline{\rho}-1)^2 = \sigma_{S_a}\left[2 - \overline{\rho} - 0{,}5(\overline{\rho}-1)^2\right]. \quad (14)$$

Даже при $\overline{\rho} = 0{,}5$ доля третьего слагаемого составит 0,125, что соответствует менее 8% от общей суммы слагаемых (14).

Если принять, что в радиусной части пуансона при формовке:

$e_S = e_i = \delta_p$, то $\sigma_\rho = \sigma_S = \sigma_{T_0} + \Pi e_S = \sigma_{T_0} + \Pi\delta_p$. (15)

Приравняв (14) и (15) получим:

$$\sigma_{T_0} + \Pi\delta_p = \sigma_{S_a}\left[2 - \overline{r_{kн}} - 0{,}5(\overline{r_{kн}} - 1)^2\right], \quad (16)$$

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

Отсюда:

$$\sigma_{\rho_a} = \sigma_{S_a} = \frac{\sigma_{T_0} + \Pi\delta_p}{2 - \overline{r_{kн}} - 0{,}5(\overline{r_{kн}} - 1)^2}. \quad (17)$$

Последнее выражение позволяет найти относительное смещение кромки $\overline{X}$ по формуле (5) из условия обрыва дна заготовки при максимальных меридиональных напряжениях в точке «а» и значении кромки $\rho = R_н$. Если окажется, что из условия обрыва дна относительное смещение больше, чем из условия, связанного с процессом вытяжки, то необходимо выбрать последнее $\overline{X}$ и считать по формуле (7). В противном случае останавливаемся на расчетах по формуле (5).

Определим высоту детали из условия постоянства объёма:

$$V_{дет} = V_ф + V_в. \quad (18)$$

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

Приняв толщину постоянной равной толщине детали найдём:

$$V_{дет} = \pi\left(\frac{r_{к_0} + r_к}{2}\right)^2 S_{дет} + \pi\frac{R_м^2 - \left(\dfrac{r_{к_0} + r_к}{2}\right)^2}{2\sin\alpha} S_{дет}, \quad (19)$$

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

$$S_{дет} = S_{заг}(1 - \delta_p). \quad (20)$$

Объём детали от процесса формовки равен:

$$V_ф = \pi R_м^2 S_{заг}. \quad (21)$$

Объём детали от процесса вытяжки:

$$V_в = \pi\left(R_з^2 - R_м^2\right)S_{заг}. \quad (22)$$

Из выражений (18÷23) имеем:

$$\alpha = \arcsin\left\{\frac{0{,}5\left[R_м^2 - 0{,}25\left(r_{к_0} + r_{к_н}\right)^2\right]S_{дет}}{\left(R_н^2 + R_з^2 - R_м^2\right)S_{заг} - 0{,}25S_{дет}\left(r_{к_0} + r_{к_н}\right)^2}\right\}, \quad (23)$$

где $r_{к_н} = r_{к_0} + r_{пр}$.

Высота детали равна:

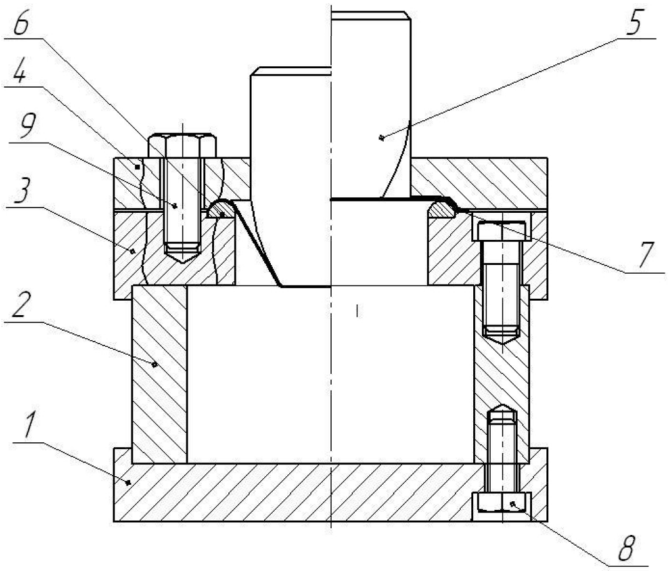
$$H = \frac{R_м - r_{ср}}{tg\alpha}, \qquad (24)$$

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

Оборудование, оснастка, материал, инструмент

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

В качестве оснастки используется экспериментальный штамп (см. рисунок 3).



1 - плита штампа; 2 - контейнер; 3 - матрица; 4 - прижим; 5 - пуансон; 6 - перетяжной порог; 7 - заготовка; 8 - винт; 9 - болт

Рисунок 3 - Общий вид штампа

Штамп состоит из плиты 1, на которой размещен контейнер 2. Заготовка 7 устанавливается на перетяжной порог 6 и плотно фиксируется прижимом 4 к матрице 3. Прижим жестко соединен с матрицей болтами 9. Высота перетяжного порога должна обеспечить отсутствие гофр во фланце, прижатом к матрице. Процесс формообразования производится до заданной глубины конической детали до полного прилегания заготовки по всей

поверхности пуансона. Полученная деталь извлекается из штампа. С силоизмерителя ЦДМПУ-30 снимается показание усилия процесса.

Для определения величины деформации по толщине применяется мерительная скоба с индикатором часового типа. Цена деления шкалы индикатора - 0,01 мм. Для замера и нанесения линейных размеров используется штангенциркуль и штангенрейсмус с ценой деления 0,05 мм.

Заготовки выполнены из стали 12Х18Н10Т. Механические свойства и константами упрочнения материала приведены в таблице 1.

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

Материал	δ_p	μ	$\sigma_{0,2}$, *МПа*	$\sigma_в$, *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;

$\sigma_в$ - предел прочности;

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

Порядок выполнения работы

1. *Обмеряют штамповую оснастку рабочих элементов:*

радиус отверстия в матрице; угол конусности пуансона; радиус перетяжного порога и.т.д. (см. рисунок 1).

2. *Определяют относительное перемещение, соответствующее максимальным напряжениям в меридиональном направлении.*

Применяют формулу (7), показатели механических свойств и константы упрочнения материала приведены в таблице 1. Коэффициент трения задается преподавателем: f =0,15.

3. *Определяют радиус заготовки.*

Применяют формулу (9).

4. *Определяют усилие прижима.*

Применяют формулу (6).

5. *Заготовку размещают на штамп, усилие прижима устанавливают с помощью силоизмерителя пресса ЦДМПУ-30.*

При постоянном усилии закрепляют болты.

6. *Проводят процесс.*

7. *Определяют усилие по силоизмерителю.*
8. *Вынимают деталь.*
9. *Замеряют толщину детали и обрабатывают результаты.*

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

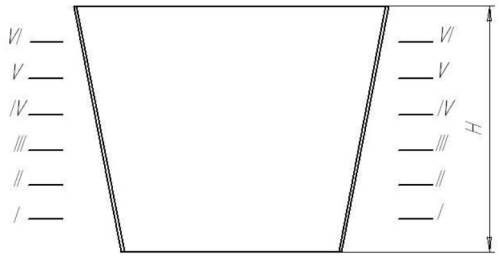


Рисунок 5 - Схема замеров детали конической формы

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

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

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:

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

Поскольку замер толщины связан со случайными ошибками, находят абсолютную погрешность измерений (доверительный интервал). Ширину доверительного интервала Δx для математического ожидания определяют числом измерений и вычисляется 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 α=90% и n=6. Заполняют таблицу замеров:

Таблица 2 - Значения толщины (мм) детали из стали 12Х18Н10Т

№ замера / № сечения	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									

Делают вывод о характере изменения толщины вдоль образующей.

10. *Определяют теоретическое значение толщины детали вдоль образующей. Сравнивают экспериментальное и теоретическое значение.*

Применяют формулу (9).

11. *Определяют объем детали.*

Применяют формулу (19), данные замеров (пункт 1).

12. *Определяют угол конусности детали. Сравнивают теоретическое значение и замеренный угол конусности пуансона.*

Применяют формулу (23), данные замеров (пункт 1).

13. *Определяют высоту детали. Сравнивают теоретическое значение и замеренную высоту детали.*

Применяют формулу (24), данные замеров (пункт 1).

4 Исследование процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов

Цель работы

Исследование процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов

Задачи

1. Выявить механизм и определить схему напряженно-деформированного состояния процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей с применением эластичного пуансона и разжимных секторов.
2. Обосновать процесс формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов.
3. Определить основные параметры процесса:

3.1 размеры заготовки;

3.2 усилие процесса;

3.3 геометрию штамповой оснастки.

Механизм процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов

Технология изготовления тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы включает часто деформирование разжимными секционными пуансонами. Но получаемые детали после штамповки по окружности в тангенциальном (широтном) направлении имеют недопустимую огранку, из-за которой геометрические формы детали не соответствуют поставленным требованиям, ухудшаются эксплутационные характеристики изделия. Получение качественной тонкостенной осесимметричной детали усеченной сужающейся формы без огранки за один ход пресса достигается за счет устройства (см. рисунок 1), которое состоит из пуансона 1, жестко соединенного с матрицей 2, эластичного элемента 3 в виде конической оболочки, раздвижных секторов 4, конуса с направляющими пазами 5, опорного кольца 6, шпилек 7, установленных в плиту штампа 8. Устройство работает следующим образом. Опорное кольцо 6 поднято вверх. Пуансон с матрицей отведены кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки 10. Раздвижные секторы 4 подняты вверх вместе с эластичным элементом 3. В этом положении устанавливают конусную заготовку сверху на эластичный элемент. Далее опускается

пуансон с матрицей до упора на опорное кольцо 6. При этом рабочие поверхности в элементах наибольшего и наименьшего диаметров касается эластичного элемента. Рабочая поверхность матрицы $h_м$ по высоте меньше высоты заготовки $h_з$, а высота эластичного элемента $h_э$ равна высоте матрицы h. При движении пуансона вниз вместе с ним опускается и матрица 2, преодолевая сопротивление опорного кольца 6, раздвижных секторов 4 и эластичного элемента 3 вместе с заготовкой 10. Секторы, опускаясь вниз по конусу 5, увеличиваются в диаметре. При этом 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.

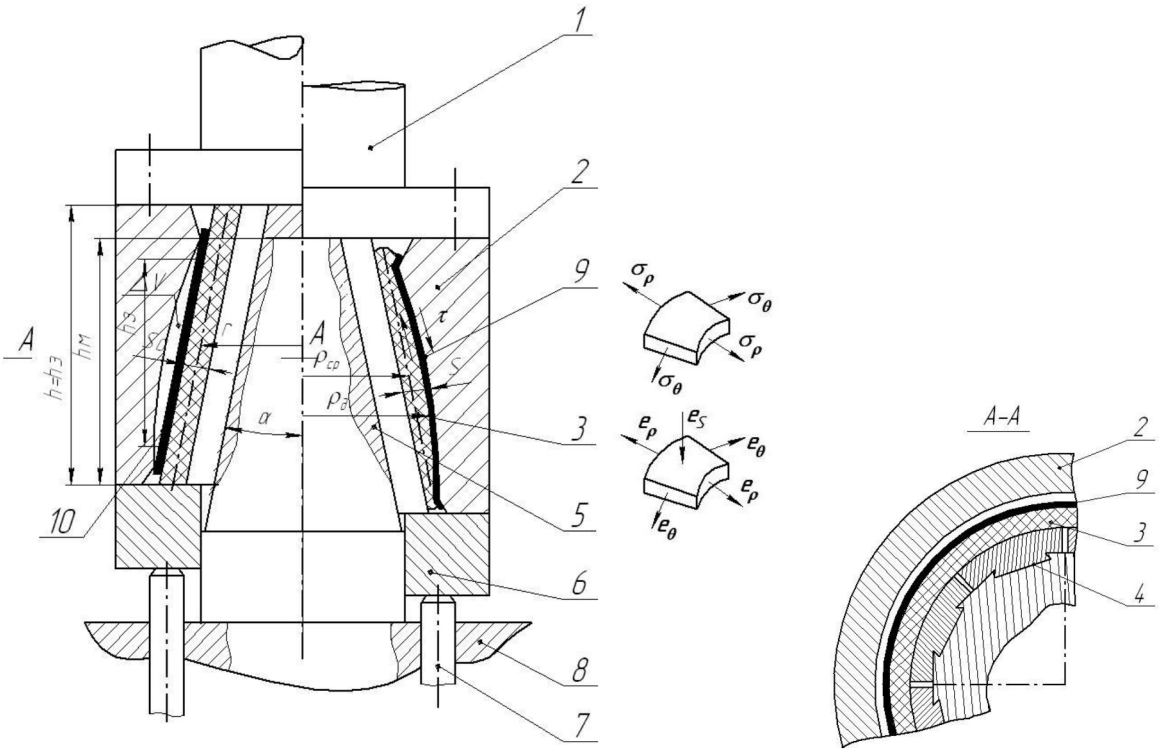


Рисунок 1- Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы

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. Приближенно можно записать, считая выполнения условия постоянства объема для эластичного элемента:

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

$$\frac{\rho_{cp} - r}{r} \approx -\frac{S - S_0}{S_0}, \qquad (1)$$

где ρ_{cp}, r – соответственно радиусы по средней поверхности средние по очагу эластичного элемента до и после деформации;

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

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

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

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

где $h_м$ - высота рабочей поверхности матрицы;

α - угол конусности конуса.

Выразим r из (1) и, подставив его в (2) после преобразований получим:

$$\rho_{cp} = \left(2 - \frac{S}{S_0}\right)\sqrt{\frac{\Delta V \cos\alpha}{\pi \cdot h_м}\left[\left(2 - \frac{S}{S_0}\right)^2 + 1\right]}. \qquad (3)$$

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

$$S = 2\left(\rho_\partial - \left(2 - \frac{S}{S_0}\right)\sqrt{\frac{\Delta V \cos\alpha}{\pi \cdot h_м\left[\left(2 - \frac{S}{S_0}\right)^2 + 1\right]}}\right). \qquad (4)$$

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

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

$$S_0 = \frac{S}{k}, \tag{5}$$

где

$$S = 2\left(\rho_o - (2-k)\sqrt{\frac{\Delta V \cos\alpha}{\pi \cdot h_м\left[(2-k)^2+1\right]}}\right), \tag{6}$$

где ρ_o – средний радиус детали.

Обоснование процесса формовки с применением эластичного пуансона и разжимных секторов

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

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

$$\rho\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\rho \cdot f}{\sin\alpha}\left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}\right) = 0, \tag{7}$$

где σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении;

σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении;

f - коэффициент трения между заготовкой и матрицей;

R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении;

R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении;

ρ - текущая координата элемента очага деформации.

С учётом соотношения $\sigma_\theta / \sigma_\rho = 0{,}5$ и условием пластичности $\sigma_\rho = \beta\sigma_S$ имеем:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_S}{d\rho} + \frac{1}{2}\sigma_S - \frac{\sigma_S \cdot f}{\sin\alpha}\left(\frac{1}{R_\rho} + \frac{1}{2R_\theta}\right) = 0. \tag{8}$$

Упрочнение учтём линейной функцией:

$$\sigma_S = \left(\sigma_{T_0} + Пe_i\right)\beta, \tag{9}$$

где $\sigma_{T_0}, П$ - константы механических свойств;

β - коэффициент Лоде.

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

$$\sigma_\rho = \sigma_S = \beta\left(\sigma_{T_0} + \Pi e_S\right),\ \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = \beta\frac{de_S}{d\rho}. \qquad (10)$$

Подставим (10) в (8), получим:

$$\frac{de_S}{d\bar{\rho}} + (\bar{\sigma}_{T_0} - e_S)\left(\frac{1}{2\bar{\rho}} + K + \frac{l}{2\bar{\rho}}\right) = 0, \qquad (11)$$

где $\bar{\sigma}_{T_0} = \frac{\sigma_{T_0}}{\Pi}$; $K = \frac{f}{\bar{R}_\rho \sin\bar{\alpha}}$; $l = fctg\bar{\alpha}$; $\bar{\alpha} = \frac{\alpha_0}{2} = const$; $\bar{\rho} = \frac{\rho}{R_б}$; $\bar{R}_\rho = \frac{R_\rho}{R_б}$.

Уравнение (11) имеет неизвестную деформацию по толщине от независимой переменной ρ. На кромках при формовке деформация e_S близка к нулю, а в средней части имеет экстремум. Ищем решение в виде многочлена:

$$e_S = -c\sin\left(\frac{1-\bar{\rho}}{1-\bar{\rho}_0}\pi\right). \qquad (12)$$

При граничных условиях: $\bar{\rho} = \frac{\rho}{R_б} = 1$; $\bar{\rho}_0 = \frac{\rho_0}{R_б}$ уравнение (12) примет вид (см. рисунок 2):

$$e_S = 0. \qquad (13)$$

Значение постоянной ищем, применив метод ортоганализации двух функций:

Функция (14) имеет экстремум. Его определим из условия $\frac{de_S}{d\bar{\rho}} = 0$ и получим:

$$\bar{\rho}_c = \frac{\bar{\rho}_0 + 1}{2}. \qquad (14)$$

Используя метод ортогонализации найдем постоянную c, подставив (12) в уравнение (11):

$$c = -\frac{\bar{\sigma}_{T_0}\left(\frac{1+2\ell}{2\bar{\rho}_c} + K\right)\left(1-\bar{\rho}_0\right)}{\left(\frac{1+2\ell}{2\bar{\rho}_c} + K\right)\left(1-\bar{\rho}_0\right)+1}.$$

Толщину детали определим по формуле:

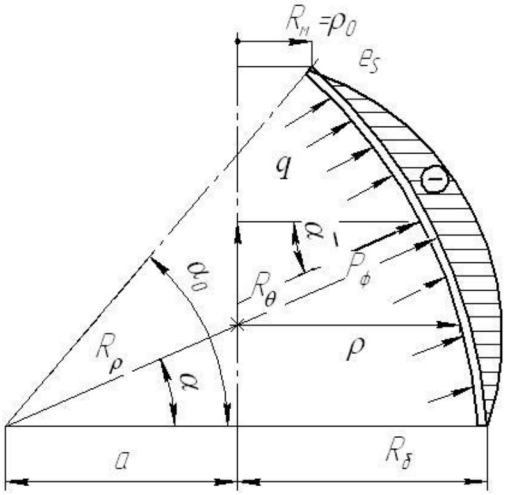
$$S_{дет} = S_{заг}\left(1 - e_S\right). \qquad (16)$$

Используя формулу Лапласа найдем давление:

$$q = \beta \cdot S_{заг}\left(1-e_S\right)\left(\sigma_{T_0} + \Pi e_S\right)\left(\frac{1}{R_\rho} + \frac{1}{R_\rho - a/\cos\frac{\alpha_0}{2}}\right). \qquad (17)$$

Выражение (17) имеет экстремум по толщине. Считая $\bar{\alpha} = \frac{\alpha_0}{2}$ постоянным, равным среднему значению:

$$e_{S_{\max}} = \frac{1-\overline{\sigma_{T_0}}}{2} \le \delta_p . \qquad (18)$$



R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении; α_0 - угол, образованный радиусом R_ρ, проведенным к кромке детали меньшего основания и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали;; α - угол, образованный радиусом R_ρ, проведенным к рассматриваемому элементу) и осью, проведенной из центра радиуса R_ρ и перпендикулярной оси симметрии детали; $R_б$ - радиус большего основания детали; $R_м$ - радиус меньшего основания детали; R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении; a - расстояние от центра радиуса R_ρ до оси симметрии; q - давление; $\overline{\alpha}$ - угол между результирующей силой, приложенной в центре очага деформации и осью симметрии

Рисунок 2- Схема для определения геометрических соотношений и эпюра деформации по толщине

Подставив (18) в (17) найдем максимально возможное давление эластичной среды на заготовку. Считаем: давление действует равномерно по всей площади заготовки; поверхность наклона конуса перпендикулярна результирующему усилию от давления. Найдем усилие:

$$P_\phi = qFf_1 \sin\overline{\alpha}, \qquad (20)$$

где f_1 - коэффициент трения сектора по конусу,

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

F - площадь поверхности очага деформации, равная:

$$F = 2\pi R_\rho \left[R_\rho \sin\alpha_0 - a\cdot\alpha_0\right];\ \overline{\alpha} = \frac{\alpha_0}{2}. \qquad (21)$$

Общее усилие составляет:

$$P = P_\phi + P_{эл.эл.} + P_б, \qquad (22)$$

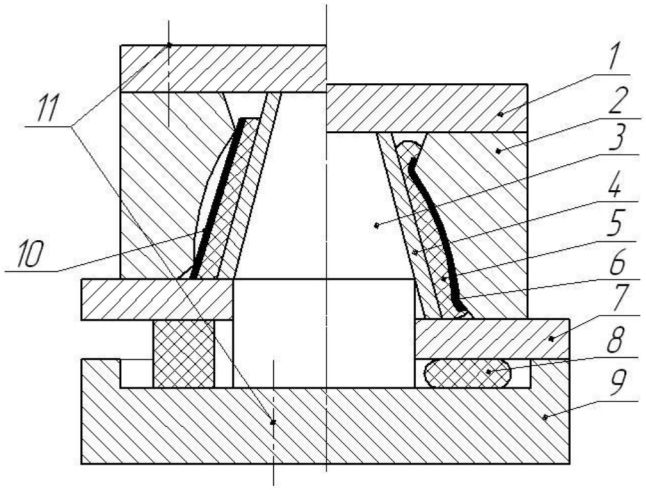
$$P_{эл.эл.} = \pi\left(D^2 - d^2\right)q, \qquad (23)$$

где $P_б$ - усилие необходимое для преодоления буферного устройства. Определяется экспериментально.

Оборудование, оснастка, материал, инструмент

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

В качестве оснастки используется экспериментальный штамп (см. рисунок 3).



1 - верхняя плита; 2 - матрица; 3 - опорный конус; 4 - сектор конуса; 5 - эластичный элемент; 6 - деталь; 7 - подкладная плита; 8 - эластичный буфер; 9 - нижняя плита; 10 - заготовка; 11- винт

Рисунок 3 - Общий вид штампа

Особенностью экспериментального штампа является то, что в качестве разжимных секторов используются сектор конуса 4, который разделен вдоль образующей на 4 равные части. При нижнем положении штампа сектора формируют сечение правильного кольца. Отсутствие направляющих секторов конуса объясняется способностью эластичного элемента 5 удерживать их, плотно прижимая к опорному конусу 3.

Для определения величины деформации по толщине применяется мерительная скоба с индикатором часового типа. Цена деления шкалы индикатора - 0,01 мм. Для замера и нанесения линейных размеров используется штангенциркуль и штангенрейсмус с ценой деления 0,05 мм.

Заготовки выполнены из стали 12Х18Н10Т. Механические свойства и константами упрочнения материала приведены в таблице 1.

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

Материал	δ_p	μ	$\sigma_{0,2}$, *МПа*	$\sigma_в$, *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;

$\sigma_в$ - предел прочности;

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

Порядок выполнения работы

С учетом размеров штамповой оснастки определяют размеры конической заготовки (см. рисунок 4): $d; D; \alpha_{заг}; S_{заг}=0{,}5мм; R_\rho$ - с помощью радиусомера или величина задается преподавателем.

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):

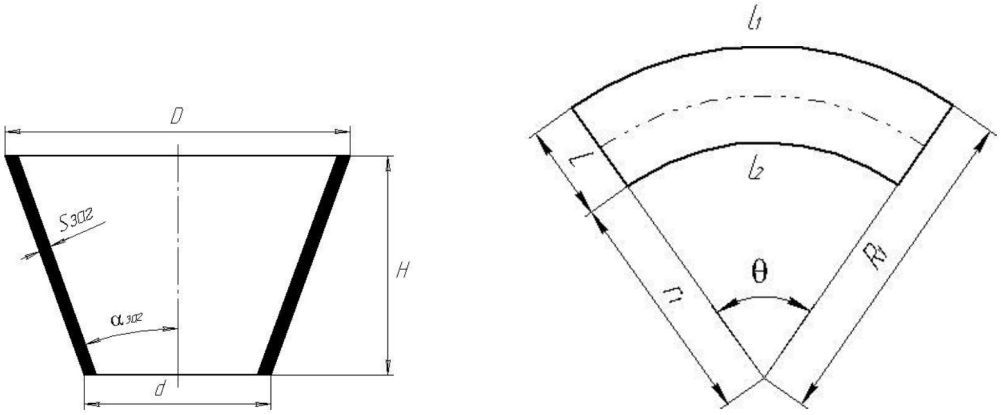


Рисунок 4 - Схема заготовки и развертки

$$R_1 - r_1 = \frac{D_з - d_з}{2\sin\alpha_{заг}},\ l_1 = \pi D_з = R_1\theta,\ l_2 = \pi d_з = r_1\theta,$$

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;

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

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

Размеры заготовки по меньшему диаметру $d_з$ и большему диаметру $D_з$ находятся с учетом припуска под зажимы:

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

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. *Собирают штамп.*

На опорный конус устанавливают сектора конуса, далее размещают эластичный элемент с конической заготовкой.

5. *Устанавливают штамповую оснастку на пресс и прикладывают усилие до соприкосновения нижней плиты с подкладной.*
6. *Вынимают заготовку, разбирая штамп в обратном порядке.*
7. *Определяют усилие по силоизмерителю.*
8. *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.

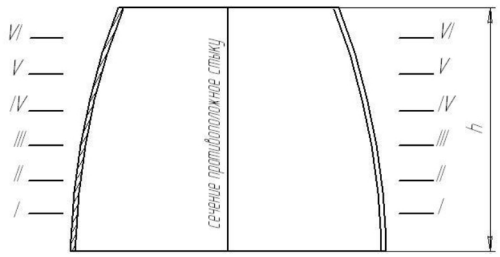


Рисунок 5 - Схема замеров детали выпуклой формы

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

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

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:

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

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 α=90% и n=6. Заполняют таблицу замеров:

Таблица 2 - Значения толщины (мм) детали из стали 12Х18Н10Т с использованием эластичного элемента

№ замера / № сечения	1	2	3	4	5	6	Среднее значение толщины	Среднеквадрат. откл.	Ширина доверит. интервала
I-I									
II-II									
III-III									
IV-IV									
V-V									
VI-VI									

9. *Разбирают штамп.*

10. Определяют усилие эластичного буфера.

На нижнюю плиту устанавливают эластичный буфер и подкладную плиту. Осаживают до их соприкосновения. Определяют усилие $P_б$ для использования его в формуле (22).

11. *Определяют давление по формуле (17).*

Необходимо учесть: для удобства работы с формулой (17), в дальнейшем и (21) рекомендуется построить геометрическую схему полученной детали, с простановкой всех необходимых измеренных и рассчитанных размеров. При вычислении деформации e_S по формуле (12) принимаем: $\overline{\rho} = \frac{\overline{\rho_0} + 1}{2}$; $\overline{\rho_0} = R_м$ (см. рисунок 2) и используем формулу (15).

12. *Определяют теоретическое значение усилия процесса по формулам (20,21,22,23).*

f_1 - задается преподавателем от 0,1 до 0,15; $P_б$ - определено экспериментально в пункте 11.

13. Сравнивают усилие процесса экспериментального и теоретического значений.

14. *Определяют теоретические значения толщин детали вдоль образующей.*

Замеряют в каждом из шести сечений радиус ρ и рассчитывают толщину детали по формулам (16,12,15). Принимают: $\overline{\rho} = \rho$, $\overline{\rho_0} = R_м$.

Таблица 3 – Теоретические значения толщины (мм) детали

№ замера / № сечения	ρ, мм	e_S, мм	$S_{дет}$, мм
I-I			
II-II			
III-III			
IV-IV			
V-V			
VI-VI			

15. Сравнивают толщину детали в шести сечениях проведенных замеров после эксперимента и теоретических значений таблицы 3.