

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

*Ф.В. ГРЕЧНИКОВ, Е.Г. ДЕМЬЯНЕНКО, И.П. ПОПОВ*

## ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.01 Машиностроение

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2015

УДК СГАУ 621.77(075)  
ББК 34.623я7  
Г815

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.П. Шеногин,  
д-р техн. наук, проф. А.А. Макаров

***Гречников Ф.В.***

Г815 Изучение основных процессов листовой штамповки: учеб. пособие / *Ф.В. Гречников, Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов* – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 76 с.

**ISBN 978-5-7883-1042-8**

Исследуются прогрессивные способы пластического деформирования и при выполнении лабораторных работ студенты изучают сущность основных процессов листовой штамповки, таких как вытяжка, обжим, раздача, отбортовка, формовка. Кратко рассмотрены и проанализированы механизмы формообразования процессов, определяются основные технологические параметры: размеры заготовки, усилие, толщины детали, количество переходов. Результаты исследований обрабатываются с использованием методов математической статистики и ЭВМ.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.01 Машиностроение.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

УДК СГАУ 621.77(075)  
ББК 34.623я7

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
Лабораторная работа 1. Исследование процесса глубокой вытяжки плоской листовой заготовки .....	7
Лабораторная работа 2. Исследование процесса вытяжки цилиндрической листовой заготовки .....	20
Лабораторная работа 3. Исследование процесса обжима цилиндрической заготовки с дном .....	28
Лабораторная работа 4. Исследование процесса раздачи цилиндрической трубной заготовки .....	32
Лабораторная работа 5. Исследование совмещенных процессов обжима, раздачи, отбортовки .....	40
Лабораторная работа 6. Исследование процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок .....	44
Лабораторная работа 7. Исследование процесса отбортовки тонкостенных осесимметричных деталей из кольцевых заготовок .....	55
Лабораторная работа 8. Исследование процессов вырубки, гибки с применением эластичной среды .....	63
Библиографический список .....	74

## 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;  
 $S_{над}$  – 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;  
 $V_{заг}, V_{дет}$  – объемы заготовки, детали, мм<sup>3</sup>;  
 $F_{заг}, F_{дет}$  – площадь заготовки, площадь детали, мм<sup>2</sup>;  
 $S_{заг}, S_{дет}$  – толщина заготовки, толщина детали, мм;  
 $e_i$  – интенсивность деформаций;  
 $\Pi$  – модуль упругости;  
 $\sigma_S$  – напряжение текучести, МПа;  
 $\sigma_{T_0}$  – экстраполированный предел текучести, МПа;  
 $k$  – коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента, 1/мм;  
 $\sigma_e$  – предел прочности, МПа;  
 $\sigma_\rho$  – напряжения в меридиональном направлении, МПа;  
 $\sigma_\theta$  – напряжения в тангенциальном направлении, МПа;  
 $f$  – коэффициент трения между поверхностями матрицы и заготовки;  
 $\mu$  – коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;  
 $R_\rho$  – радиус детали в меридиональном направлении, мм;  
 $R_\theta$  – радиус детали в тангенциальном направлении, мм;  
 $q$  – давление, создаваемое эластичным элементом, МПа;  
 $e_S$  – деформация по толщине;  
 $e_\rho$  – деформация в меридиональном направлении;  
 $e_\theta$  – 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

Большое количество деталей авиационной техники изготавливают по технологии, в которой заложены инструментальные процессы штамповки. К ним в первую очередь относятся процессы вытяжки, обжима, раздачи, отбортовки, формовки.

К деталям авиационной техники предъявляются высокие требования по точности, надежности в эксплуатации. Задача технолога состоит в том, чтобы спроектировать технологический процесс с минимальным числом переходов и высоким коэффициентом использования материала. Важное место в достижении этого результата должно уделяться вопросам технологии, которые учитывают разнотолщинность получаемых в результате листовой штамповки деталей.

Известно, например, что разнотолщинность многократной вытяжки составляет 50-100%. Это является одной из основных причин уменьшения степени формообразования на последующих операциях штамповки, снижения коэффициента использования материала, т.к. не всегда полученный характер изменения толщины, ее величина на штампованной детали соответствуют эксплуатационным характеристикам. Находят выход в том, что исходную толщину заготовки выбирают завышенной на определенную величину разнотолщинности. Для деталей авиационной техники, подвергающихся механической обработке, положение ухудшается тем, что увеличивается трудоемкость механической обработки из-за дополнительного объема металла, снимаемого в стружку.

Поэтому с технической и экономической точек зрения очень важно проектировать технологический процесс так, чтобы он направленно изменял толщину заготовки. В первую очередь этого можно достичь последовательным совмещением разных схем напряженно-деформированного состояния для всей заготовки или отдельных ее участков как в однопереходных, так и многопереходных процессах.

Такой подход, во-первых, дает возможность вести формоизменение на каждой операции с максимальными коэффициентами даже для деталей, имеющих жесткие ограничения по толщине стенки. Это объясняется тем, что, накладывая на элементы заготовки разные схемы напряженно-деформированного состояния, на последующих операциях можно компенсировать полученное ранее утонение или утолщение, во-вторых, получать техпроцессы с более высоким коэффициентом использования металла.

Настоящее учебное пособие включает работы, связанные с изучением процессов вытяжки, обжима, раздачи, отбортовки, формовки, в которых рассматриваются их основные технологические параметры. При

выполнении лабораторных работ студенты изучают сущность основных процессов листовой штамповки, исследуют взаимосвязь основных параметров процессов на разнотолщинность детали, предельных коэффициентов формообразования, силовых, геометрических факторов. Результаты исследований обрабатываются с использованием методов математической статистики и ЭВМ.

Такое построение лабораторных работ позволяет на экспериментальном материале глубоко осмыслить суть рассматриваемых явлений и подготовить студентов для творческой работы над курсовыми и дипломными проектами. Лабораторные работы по усмотрению преподавателя могут выполняться индивидуально или группой студентов.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ ПЛОСКОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ**

**Цель работы** – изучение сущности процесса глубокой вытяжки из плоской листовой заготовки.

### **Задачи**

Изучить схему и напряженно-деформированное состояние процесса вытяжки из плоской заготовки.

Установить основные параметры, влияющие на величину и характер разнотолщинности.

Определить минимальное усилие прижима из условия устойчивости фланца.

Провести обработку результатов замера толщин с использованием математических методов [1].

### **Механизм процесса глубокой вытяжки**

Вытяжка – это операция получения полых деталей из листовой заготовки. При деформировании заготовки в процессе вытяжки происходит неравномерное изменение ее толщины. Поэтому вытянутая деталь имеет по длине образующей разную толщину. Разнотолщинность рассматриваемых деталей достигает 40-50% (рис. 1):

$$\frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\max}} = 0,4 - 0,5.$$

Схемы рассматриваемого процесса вытяжки и напряженно-деформированного состояния представлены на рис. 2. Пластическое деформирование заготовки начинается на свободном кольцевом участке (рис. 2, а), расположенном между вытяжным ребром матрицы  $r_m$  и радиусом округления пуансона  $r_n$ . Начальная стадия вытяжки характеризуется интенсивным утонением свободного участка. За счет деформации утонения происходит удлинение и поворот рассматриваемой части заготовки, что вызвано вертикальным перемещением пуансона.

При этом фланец заготовки, находящийся под прижимом, остается неподвижным, так как усилие на свободном участке недостаточно для втягивания его в отверстие матрицы (рис. 2, б). Рост тянущего усилия происходит за счет упрочнения деформируемой свободной кольцевой части. При достижении определенной величины усилия на свободном участке начинается сокращение фланца заготовки. Начавшаяся стадия вытяжки характеризуется равновесием тянущего усилия и усилия сопротивления фланца.

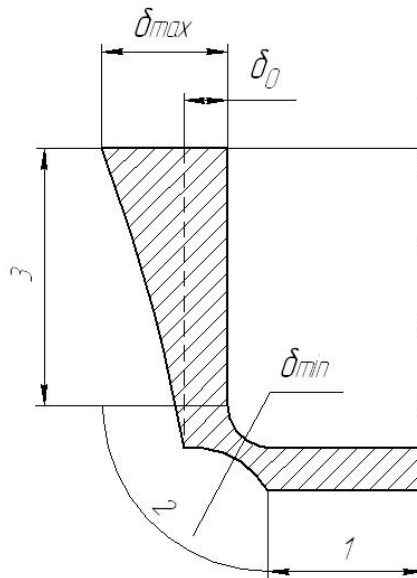


Рис.1. Характер изменения толщины детали после вытяжки плоской заготовки [2]:  $\delta_0$  – толщина исходной заготовки;  $\delta_{max}, \delta_{min}$  – максимальная и минимальная толщина; 1 – участок дна; 2 – радиусный участок; 3 – цилиндрический участок

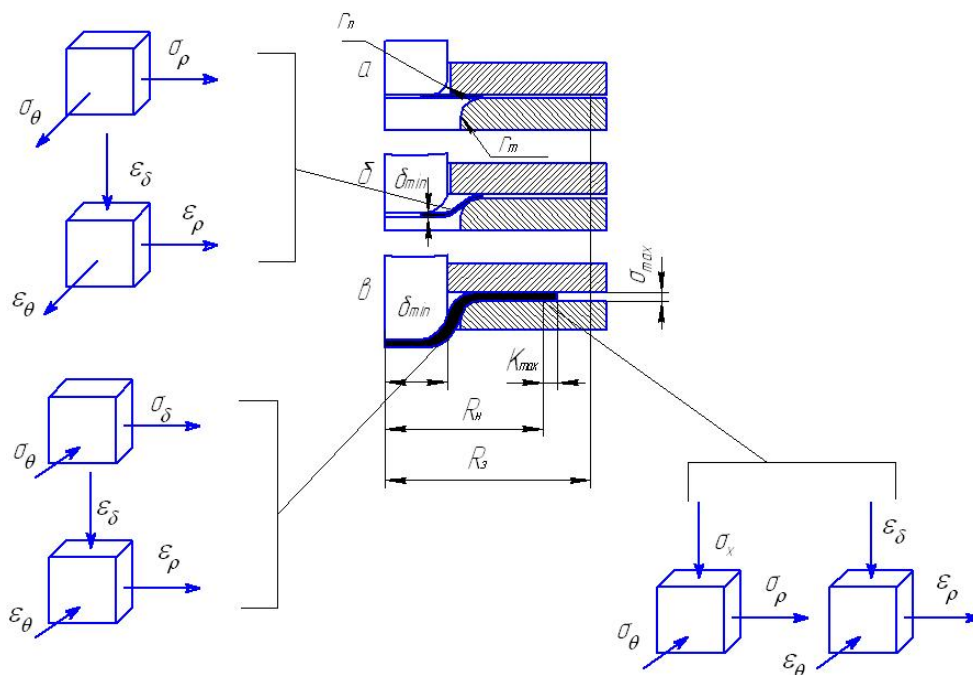


Рис. 2. Схемы последовательности процесса глубокой вытяжки и напряженно-деформированного состояния:  $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_k$  – соответственно радиальное, тангенциальное, контактное напряжения;  $\xi_\rho, \xi_\theta, \xi_\delta$  – радиальная, тангенциальная деформация и деформация по толщине заготовки [3]



Однако рост усилия и утонение свободного участка не прекращаются. Тянущее усилие растет пропорционально *усилию сопротивления, которое увеличивается в связи с упрочнением при деформации фланца заготовки*. Развитие этого процесса приводит к возникновению на свободном участке опасного сечения, в котором наряду с действием наибольших растягивающих напряжений наблюдается наименьшая толщина, достигающая своего экстремального значения при перемещении фланца заготовки на величину  $X_{\max}$  (рис. 2, в) [4]:

$$X_{\max} = \frac{1}{2} D_3 \psi_u \ln K,$$

где  $D_3 = 2R_3$  – диаметр плоской заготовки;

$\psi_u$  – величина относительного равномерного сужения материала заготовки;

$K = \frac{D_3}{d_0}$  – коэффициент вытяжки;

$d_0 = 2r_0$  – диаметр детали по нейтральной поверхности.

При достижении предельного значения деформации утонения происходит обрыв дна заготовки.

Максимальное значение  $K$ , при котором заготовка вытягивается, не разрушаясь, называется предельным коэффициентом вытяжки. Величина предельного коэффициента вытяжки определяется на стадии, ограниченной перемещением края фланца заготовки на величину  $X_{\max}$ . Дальнейшее деформирование заготовки на заключительных стадиях характеризуется отсутствием утонения.

Однако разнотолщинность заготовки увеличивается в результате утолщения края фланца заготовки. На характер разнотолщинности вытяжки плоской заготовки влияют следующие параметры процесса, геометрические: коэффициент вытяжки  $K$ , радиусы закругления пуансона  $r_n$ , матрица  $r_m$ , величина зазора между матрицей и пуансоном:

$$z = \frac{d_m - d_n}{2},$$

где  $d_m$ ,  $d_n$  – соответственно диаметры отверстия матрицы и пуансона.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ПРИЖИМА

Сила прижима фланца заготовки определяется его устойчивостью (складкообразованием от тангенциальных напряжений). Необходимо усилие прижима выбирать так, чтобы оно обеспечивало устойчивое протекание процесса вытяжки при его минимальном значении.

При решении вопросов устойчивости наиболее широко используется энергетический критерий, согласно которому вариация энергии деформируемого тела при возможно малом его отклонении формы, т.е. его малых перемещениях (вариациях) от того положения, в котором тело находится в равновесии, равна нулю ( $\delta\mathcal{E}=0$ ). Энергия деформируемого тела равна сумме потенциальной энергии деформации  $U$  и энергии от внешних сил  $A$ . Таким образом  $\delta\mathcal{E}=\delta(U+A)$ . Интегрируя последнее равенство, получим  $U+A=C$ . Принимая за критическое состояние нулевой уровень энергии  $\mathcal{E}=0$ , произвольная постоянная  $C=0$  [5].

Внутренняя потенциальная энергия изгиба:

$$U = \iint_F \frac{\delta^3 E_c}{18} [x_\theta^2 + x_r^2 + x_r x_\theta + x_{r\theta}^2 - \frac{3}{4} \frac{x^2}{\sigma_i^2} (1-n)] A_1 A_2 d\theta dr, \quad (1)$$

где  $\theta, r$  – направление осей в криволинейной системе координат;

$F$  – площадь фланца;

$E_c = \frac{\sigma_i}{\xi_i}$  – секущий модуль или модуль пластичности;

$\sigma_i, \xi_i$  – интенсивности напряжений и деформаций;

$A_1, A_2$  – коэффициенты квадратичной формы;

$x_\theta, x_r, x_r x_\theta$  – кривизны оболочки при ее выпучивании;

$\sigma_i$  – интенсивность напряженного состояния элемента заготовки в момент потери устойчивости,

$n$  – константа степенной кривой упрочнения.

Например, кривизна оболочки в направлении координаты  $\theta$  равна

$$x_\theta = \frac{1}{R_\rho},$$

где  $R_\rho$  – радиус выпучивания оболочки (см. рис. 3);

$$x = x_r \sigma_r + \sigma_\theta x_\theta.$$

Потеря устойчивости элемента в пластической области приводит к изменению формы срединной поверхности элемента. Поскольку выпучивание бесконечно мало, то считаем, что нейтральная поверхность при изгибе совпадает со срединной, т.е. отсутствуют зона разгрузки и изменение квадратичной формы.

Если мы рассматриваем плоскую заготовку в виде круга в цилиндрической системе координат, то величины коэффициентов равны соответственно [6]:

$$A_1 = 1, A_2 = r.$$

Величина радиуса свободного изгиба может быть выражена через величину прогиба произвольной точки складки, т.е. ее расстояния от срединной до исходной срединной поверхностей  $\omega$ .

В нашем случае кривизна существует в одном направлении. Через прогиб она выразится так:

$$x_\theta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – функция прогиба срединной поверхности.

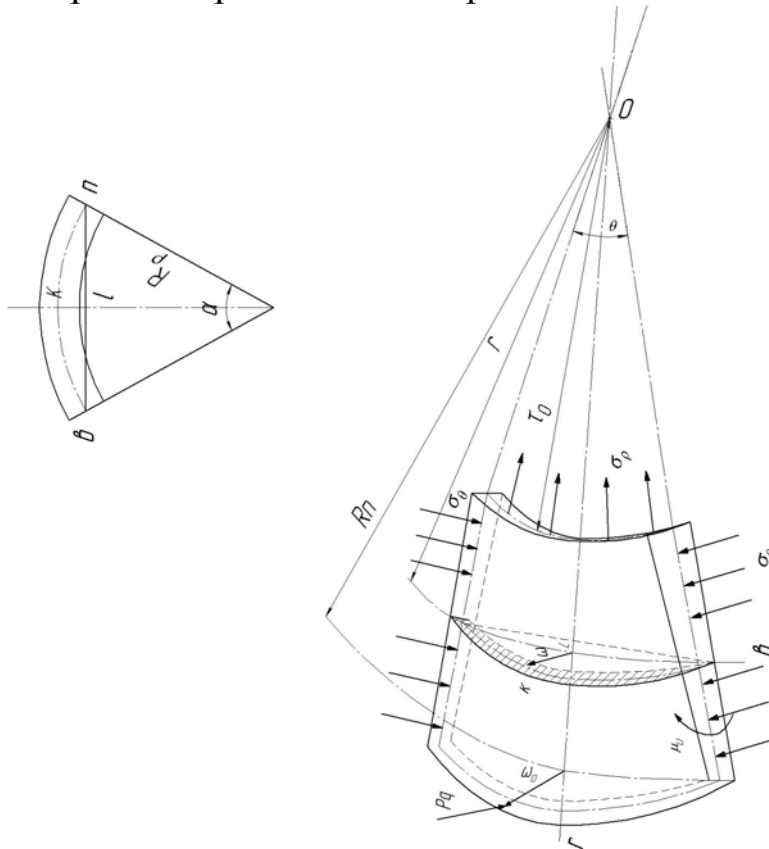


Рис. 3. Схема выпученного элемента фланца

Последняя выбирается с учетом того, какова форма потери устойчивости. Важным при выборе функции является то, чтобы она совпадала с граничными условиями. Выбираем функцию прогиба в виде

$$\omega = \omega_0 \sin \frac{i\theta}{2}, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  – максимальная амплитуда полуволны;

$i$  – число полуволн, образующихся при выпучивании.

Выбранная функция удовлетворяет граничным условиям. При  $\theta = 0$ ,  $\omega = 0$  а при,  $\theta = \frac{2\pi}{i}$  и  $\theta = \frac{\pi}{i}$   $\frac{d\omega}{d\theta} = 0$ , т.е. на вершине полуволны прогиб максимальный.

С учетом выбранной функции при отсутствии изгиба в направлении

$$x_\theta = x_{r\theta} = 0,$$

потенциальная энергия изгиба (1) примет вид

$$U = \int_{r_0}^{R_n} \int_0^{2\pi} \frac{\delta^3 E_c}{18} \left( x_\theta^2 - \frac{3}{4} \frac{x_\theta^2 \sigma_\theta}{\sigma_i^2} (1-n) \right) r dr d\theta, \quad (4)$$

где  $x_\theta$  определяется по формуле (2).

При вытяжке фланца  $\sigma_\theta = \sigma_i$  равенство (4) принимает вид

$$U = \int_{r_0}^{R_n} \int_0^{2\pi} \frac{\delta^3 E_c}{72} (1+3\Pi) x_\theta^2 r dr d\theta. \quad (5)$$

После определения кривизны по формуле (2) с учетом (3), подстановки ее в равенство (5) и интегрирования получим:

$$U = - \frac{\Pi \delta^3 E_c (1+3n) \omega_a^2 i^4 (R_n^2 - r_0^2)}{18 \cdot 128 (R_n^2 - r_0^2)}. \quad (6)$$

При выпучивании элемента поперечные размеры его уменьшаются и силы, образованные тангенциальными напряжениями, совершают работу по контуру элемента. Это работа контурных сил. Ее величина в соответствии с принятой функцией равна [6]:

$$A = \frac{\delta}{2} \int_{r_0}^{R_n} \int_0^{2\pi} \sigma_\theta \left( \frac{\partial \omega}{\partial \theta \cdot r} \right)^2 r dr d\theta. \quad (7)$$

Считаем, что величина тангенциального напряжения постоянна по радиусу и равна  $\sigma_i$ . После подстановки значения функции прогиба и интегрирования

$$A = \frac{1}{2} \delta \ln \frac{R_n}{r_0} \omega_0^2 i^2 \sigma_i \Pi. \quad (8)$$

Если вытяжка проводится с прижимом заготовки, то при ее выпучивании прижим также совершает работу [5]. Сила прижима может быть представлена в виде двух слагаемых:

$$P_\partial = P_0 + hS, \quad (9)$$

где  $P_0$  – начальное значение прижима;

$h$  – перемещение прижима;

$S$  – жесткость прижима. Это усилие надо затратить, чтобы переместить прижим на 1 мм.

Работа, совершаемая прижимом, выражается соотношением

$$A_{np} = \int_0^{2\omega_0} P_\delta dh = 2P_0\omega_0 + 2\omega_0^2 S. \quad (10)$$

В соответствии с критерием устойчивости, равным нулевому уровню энергии, с учетом равенств (6), (8), (10) будем иметь:

$$-\frac{\Pi\delta^3 E_c (1+3n)\omega_0^3 i^4}{18 \cdot 128 R_n^2 r_0^2} + \frac{1}{2} \delta \ln \frac{R_n}{r_0} \omega_0^2 i \sigma_i \Pi - 2s\omega_0^2 = 0.$$

Знак минус в работе прижима выбран из соображения ее противоположности работе контурных сил. Кроме того, считаем, что начальное значение усилия  $P_0 = 0$ . Из последнего уравнения баланса работ выразим критерий жесткости:

$$S = -\frac{\Pi\delta^3 E_c (1+3n)i^4 (R_n^4 - r_0^4)}{36 \cdot 128 R_n^2 r_0^2} + \frac{1}{4} \Pi \delta \sigma_i \cdot i^2 \ln \frac{R_n}{r_0}.$$

Минимальное значение критерий принимает при определенных значениях параметра  $i$  функции прогиба. Для определения величины  $i$ , при которой жесткость принимает экстремальное значение, необходимо взять производную по  $i$  и приравнять ее нулю  $\frac{\partial S}{\partial i} = 0$ . В результате получим:

$$\frac{(R_n^2 - r_0^2) \Pi i^2 \delta^3 E_c (1+3n)}{R_n^2 r_0^2 \cdot 144} - \Pi \ln \frac{R_n}{r_0} \sigma_i \delta = 0.$$

После преобразований величина имеет вид

$$i = \frac{12}{\delta} \sqrt{\frac{\ln \frac{R_n}{r_0} \sigma_i R_n^2 r_0^2}{(1+3n) E_c (R_n^2 - r_0^2)}}. \quad (11)$$

В последнем выражении отношение  $\frac{\sigma_i}{E_c}$  можно представить:

$$\frac{\sigma_i}{E_c} = \frac{\sigma_i \xi_i}{A \xi_i^n} = \frac{A \xi_i^n \xi_i}{A \xi_i^n} = \xi_i \approx \xi_\theta = \ln \frac{K}{\frac{R_n}{r_0}},$$

где  $K = \frac{R_3}{r_0}$  коэффициент вытяжки.

С учетом последнего равенства выражение (11) можно записать:

$$i = \frac{12}{\delta} \lambda \sqrt{\frac{\ln \lambda (\ln K - \ln \lambda)}{\lambda^2 - 1}}, \quad (12)$$

где  $\lambda = \frac{R_n}{r_0}$ ,  $\delta = \frac{\delta}{r_0}$ .

Изложенная методика впервые была предложена С.П.Тимошенко [7]. Выражение (12) имеет максимум в зависимости от величины  $\lambda$ . В начальный момент при  $R_n = R_k$ ,  $i = 0$ , при  $R_n = r_0$ , когда фланец полностью вытянется,  $i = 0$ . Чтобы определить значение  $\lambda$ , при котором число полуволн максимально, найдем производную  $\frac{\partial i}{\partial \lambda}$  и приравняем ее нулю. Будем считать, что  $\ln \lambda = \lambda - 1$ . После решения получим:

$$\lambda = \frac{L}{4} + \sqrt{\frac{L^2}{16} + \frac{3 - 2L}{2}},$$

где  $L = 1 - \ln K$ .

Последнее выражение имеет тем большее значение, чем больше  $K$ . При  $K = 2,73$   $\lambda = 1,22$ .

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ЗАГОТОВКИ

Значительное влияние на утонение оказывают коэффициент вытяжки, трение, упрочнение. Напряжения, которые обусловлены указанными факторами, можно найти в работе [8]:

$$\sigma_\rho = (\sigma_r + \sigma_{mp})(1 + 1,6f) + \sigma_{изг}, \quad (13)$$

где  $\sigma_r$  – радиальное растягивающее напряжение, непосредственно связанное с деформацией;

$\sigma_{mp}$  – удельное сопротивление трения от силы прижима;

$f$  – коэффициент трения;

$\sigma_{изг}$  – сопротивление от изгиба на кромке находится по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{\sigma_6}{\left(\frac{2r_m}{\delta} + 1\right)}.$$

Зависимость показывает, что с уменьшением радиуса матрицы до нуля напряжение от изгиба достигает предела текучести. Поэтому при малых радиусах округления кромки резко увеличивается утонение заготовки. Как правило, отношение  $\frac{r_m}{\delta}$  берут в пределах  $8 \div 10$ . Это, с одной стороны, дает небольшие напряжения от изгиба, а с другой стороны –

обеспечивает устойчивость фланца заготовки, находящегося над кромкой матрицы.

Радиальное напряжение

$$\sigma_r = f_1(K - f_1')\sigma_g\alpha',$$

где  $f_1, f_1', \sigma_g$  – константы металла, находятся по таблице в работе [2];  $\alpha'$  – коэффициент, учитывающий влияние анизотропии:

$$\alpha' = \frac{1}{2(1-\mu)} \ln \frac{\sqrt{2} + \sqrt{1-\mu}}{\sqrt{2} - \sqrt{1-\mu}},$$

где  $\mu = \frac{\mu_{12} + \mu_{21}}{2}$  – средний коэффициент поперечной деформации [9];

$\mu_{12}, \mu_{21}$  – коэффициенты поперечной деформации (первый индекс показывает ее направление, а второй – действие растягивающей силы при линейной схеме напряжений).

Сопротивление трения от силы прижима

$$\sigma_{mp} = \frac{f\rho_g}{2\pi R_M \delta},$$

где усилие прижима находится по формуле (9).

Максимальную величину утонения в опасном сечении можно определить, если считать, что на установившейся стадии вытяжки оно деформируется в условиях плоской деформации. В этом случае интенсивность деформации равна [9]

$$\xi_i = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}} \xi \delta,$$

где  $\xi \delta$  – деформация утонения в опасном сечении.

Учитывая степенной закон упрочнения  $\sigma_{il} = A\xi_i^n$  и последнее равенство, найдем:

$$\sigma_{il} = A \frac{\xi^n \delta^n}{(1-\mu^2)^{\frac{n}{2}}}. \quad (14)$$

Величина  $\sigma_{il}$  для плоскодеформированного состояния [9]

$$\sigma_{il} = \sqrt{1-\mu^2} \sigma_2. \quad (15)$$

Из выражений (14), (15) находим:

$$\xi_\delta = - \left( \frac{\sigma_r}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{1-\mu^2}^{\frac{1+n}{n}}. \quad (16)$$

Наиболее утолщенная часть при вытяжке – это кромка заготовки. Набор толщины идет за счет уменьшения диаметра фланца. Если считать, что кромка фланца деформируется в условиях линейной схемы деформации [4], то деформация утолщения составит:

$$\xi_{\delta} = \mu \ln \frac{R_n}{r_0}. \quad (17)$$

Из формул (16), (17) находим значение толщин в наиболее утоненном и утолщенном местах:

$$\delta_{\min} = \delta_0 \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_{\rho}}{A} \right)^{\frac{1}{n}} (1 - \mu^2)^{\frac{1+n}{2n}} \right], \quad (18)$$

$$\delta_{\max} = \delta_0 \exp \left( \mu \ln \frac{R_n}{r_0} \right). \quad (19)$$

Здесь значение  $\sigma_{\rho}$  определяется формулой (13). Величину разнотолщинности найдем  $\delta_{\max} - \delta_{\min}$ .

### **Оборудование, оснастка, материалы, приборы**

В качестве оборудования используется кривошипный пресс К-30, гидравлические прессы ЦДМУ-30. Последние имеют шкалы с усилиями 300 кН, 150 кН, 50 кН с ценой деления соответственно 3,0 кН; 1,5 кН; 0,5 кН.

Выбор силового оборудования определяется преподавателем в зависимости от степени полноты задания.

Исследование операции вытяжки проводят в специальных штампах. Штамп состоит из пуансона 1, прижима 2, матрицы 3, болтов 4, матрицедержателя 5 (рис. 4).

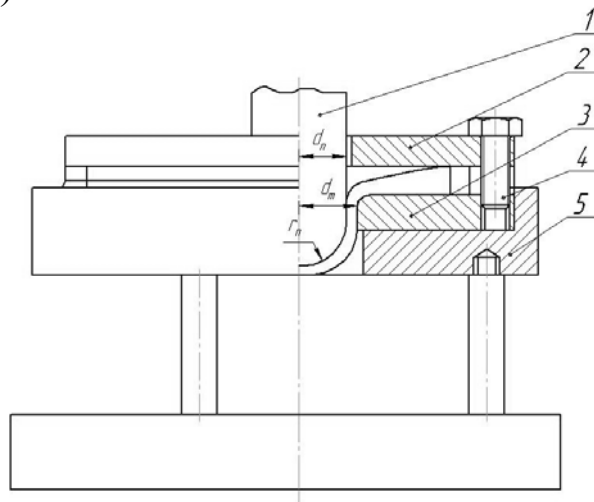


Рис. 4. Штамповая оснастка



Матрица и прижим скреплены между собой болтами 4, образуя сменный блок, который устанавливается на матрицедержатель 5. Рабочие поверхности матрицы и прижима образуют гарантированный зазор. Достигается это тем, что на обращенных друг к другу поверхностях матрицы и прижима выполнены уступы, размещенные полукольцом по наружному диаметру.

Штамп работает следующим образом. Плоская заготовка подается горизонтально в зазор между матрицей и прижимом, которые устанавливаются в матрицедержатель штампа. При сокращении край фланца утолщается наиболее сильно и прижимается к матрице. Поэтому величина гарантированного зазора равна наибольшей толщине, которая определяется по формуле (19).

Кроме того, ослабляя болты, можно увеличить величину зазора на необходимую величину и регулировать тем самым гофрообразование, т.е. число складок на фланце.

Для установления влияния геометрических параметров штампа (радиусов закругления матрицы  $r_m$ , пуансона  $r_n$ , коэффициента вытяжки) имеется набор блоков матрицы и прижима, приведенный в табл. 1.

Таблица 1. Размеры блоков штампа, мм

Номер штампа	$d_n$	$r_m$	$r_n$	$d_m$	$D_3$
1	90	16	25	95	160
2	-	-	-	-	180
3	90	8	25	95	180
4	90	25	25	95	180
5	90	16	45	95	180

Все штампы имеют зазор между матрицей и пуансоном, равный 2,5 мм, что позволяет проводить вытяжку из материала менее 2,0 мм без принудительного утонения кромки заготовки. Разные радиусы закруглений матриц  $r_m$ , пуансонов  $r_n$ , диаметр заготовки позволяют исследовать влияние этих параметров на разнотолщинность детали.

Исследование влияния анизотропии на разнотолщинность осуществляется при помощи использования разных материалов на алюминиевой и медной основе толщиной 1,3 – 2 мм.

Толщина вытянутой детали замеряется часовыми индикаторами с ценой деления 0,01 мм, установленными на стойках, размеры штамповой оснастки – штангенциркулем, угломером, радиусом. Разметку заготовок проводят циркулем.

### **Порядок выполнения работы**

1. Исследования влияния одного из параметров процесса вытяжки на разнотолщинность вытянутой заготовки проводятся бригадами в 2-3 человека. Перед вытяжкой на плоскую заготовку наносится диаметрально-ная линия, она нумеруется числом, соответствующим номеру штамповой оснастки. Замеряются толщина и диаметр заготовки.

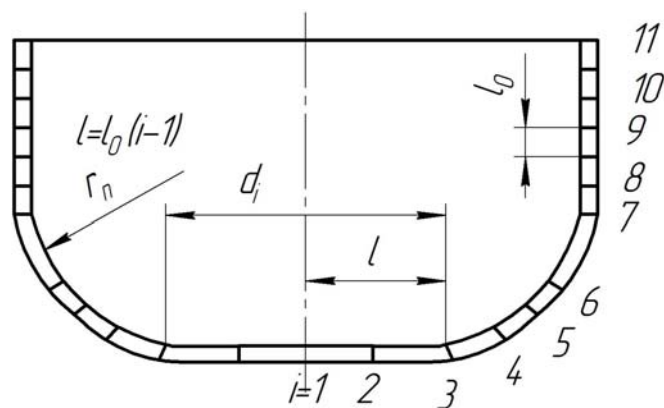


Рис. 5. Схема разметки вытянутой заготовки

2. Преподавателем даются значения коэффициентов механических свойств материала ( $A$ ,  $n$ ,  $\sigma_s$ ,  $\mu$ ,  $f_1$ ,  $f_1'$ ,  $f$ ), величина допустимой волнистости  $\omega_0$ .

3. Проводится процесс вытяжки. На вытянутой заготовке по диаметральной линии от оси через равные промежутки  $l_0 = 8-10$  мм наносятся циркулем точки (рис. 5). Замеряют толщины заготовок в различных сечениях, номера которых должны соответствовать номеру точки, и заносят в табл. 1,2 и т.д., предварительно распределив значения толщин по участкам.

4. По следам, имеющим место на торце детали, подсчитывается число полуволн, образующихся при вытяжке.

5. По формуле (12) определяем число полуволн и сравниваем с числом эксперимента, находим усилие прижима по формуле (9) при  $h = \omega_0$ .

6. Расчетным путем, используя формулы (13), (17), (18), определяем минимальное утонение и максимальное утолщение заготовки и сравниваем с экспериментальными данными.

### **Содержание отчета**

1. Схемы процесса вытяжки и напряженно-деформированного состояния.

2. Результаты эксперимента по замеру толщин в виде табличных данных по прилагаемой форме (табл. 1, 2).

3. Промежуточные, проверочные данные, в отчете необходимо сопоставить данные исследований каждой бригады, сделать вывод о том, как тот или иной параметр оказывает влияние на разнотолщинность.

***Вопросы для закрепления материала***

1. В чем сущность процесса вытяжки из плоской заготовки?
2. Какие параметры процесса вытяжки определяют разнотолщинность штампуемой детали?
3. Каков механизм образования разнотолщинности вытягиваемой плоской заготовки?
4. Какое влияние на утонение плоской заготовки оказывает упрочнение материала?
5. Из какого условия определяются предельные возможности процесса вытяжки?
6. Для чего используется прижим заготовки?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ**

**Цель работы** – изучение сущности процесса последующего перехода вытяжки из цилиндрической заготовки.

#### **Задачи**

Изучить особенности процесса последующего перехода вытяжки.

Установить влияние сил трения на разнотолщинность вытянутой детали.

Установить предельный коэффициент вытяжки с активными силами трения.

Провести обработку результатов замеров толщин.

#### **Механизм процесса вытяжки в штампе последующего перехода**

При вытяжке цилиндрического стакана из плоской заготовки можно получить деталь с ограниченным отношением высоты к диаметру, которое обусловлено предельным коэффициентом вытяжки. Если требуется получить детали с отношением высоты к диаметру большим, чем получают без разрушения, то приходится расчленять процесс на несколько переходов.

При изготовлении деталей авиационного профиля предельный коэффициент часто ограничен не разрушением в опасном сечении, а допустимым утонением заготовки, т.е. допустимой толщиной детали.

Возможность получения деталей с меньшим диаметром на последующих переходах объясняется двумя факторами. Во-первых, заготовка в виде цилиндрического стакана имеет меньший диаметр, чем исходная плоская, во-вторых, опасное сечение 1 (рис. 2) заготовки переместилось в другое место заготовки 2, которое практически не утонялось на 1-м переходе, а значит, способно нести большую нагрузку. Это особенно сильно проявляется после обжима вытянутой на 1-м переходе цилиндрической заготовки. Другими особенностями вытяжки последующего перехода является то, что исходная заготовка имеет вдоль образующей разную толщину и упрочнение. Это приводит к тому, что в установившейся стадии, когда заготовка охватила радиусную часть, усилие вытяжки все время растет вплоть до момента уменьшения диаметра торца заготовки. В этот момент наблюдаются и самые большие напряжения в опасном сечении, которое интенсивно утоняется. Для уменьшения напряжений и утонения в опасном сечении можно использовать активные силы трения по поверхности контакта вытянутой цилиндрической части заготовки и пуан-

сона. Для этой цели в цилиндрическую часть матрицы устанавливается упругое кольцо [10] (рис. 1).

Это вызывает активные силы трения  $\tau$  на внутренней поверхности заготовки (рис.2).

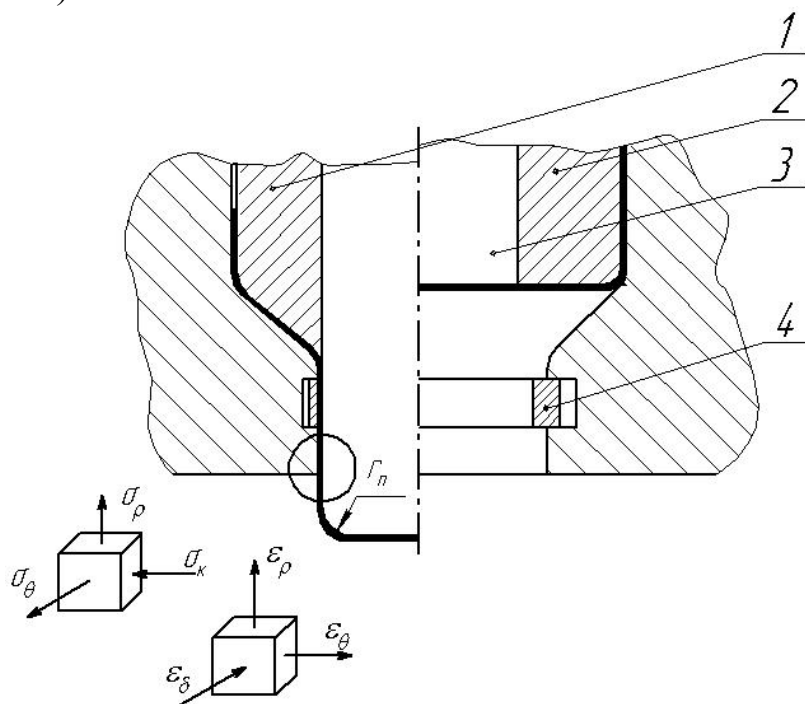


Рис. 1. Схема напряженно-деформированного состояния последующего перехода вытяжки:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – прижим; 4 – упругое кольцо

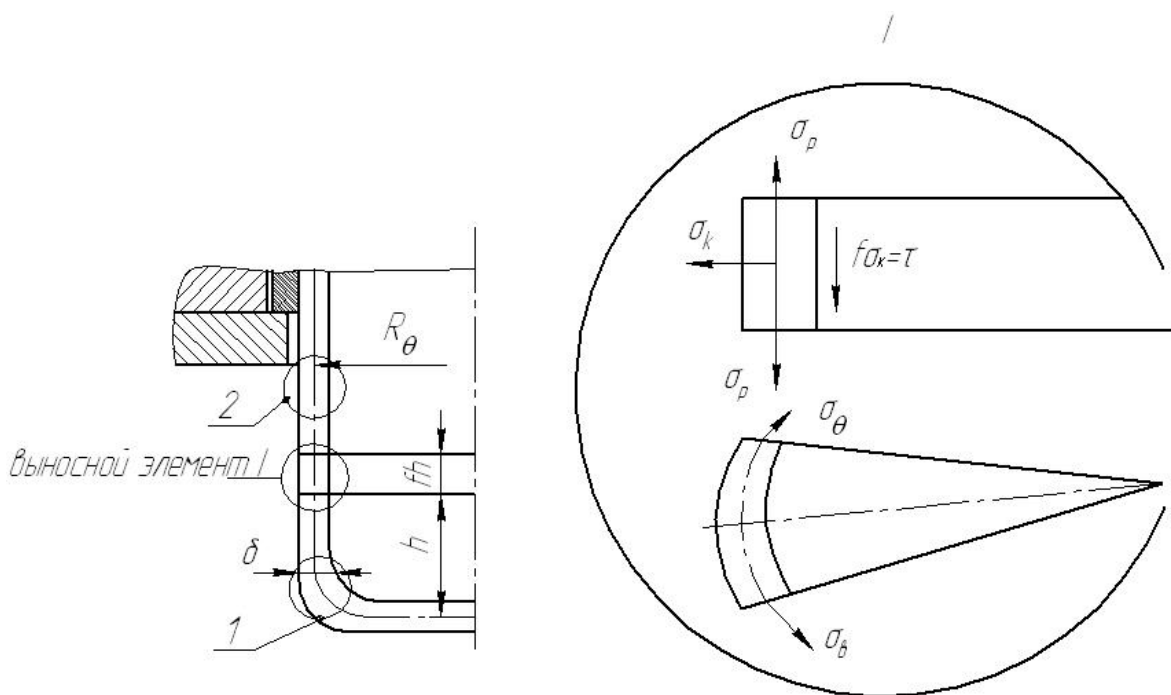


Рис. 2. Схема действия активных сил трения

С увеличением высоты цилиндрической части увеличиваются и активные силы трения, которые разгружают опасное сечение. Особенностью такой схемы вытяжки является то, что она происходит в условиях плоскодеформированного состояния, т.е. ввиду постоянства диаметра  $d_n$  тангенциальная деформация равна нулю. Если считать, что схема напряженного состояния близка к плоской, то получим известное соотношение  $\sigma_\theta = 0,5\sigma_\rho$ .

Для цилиндрической части заготовки уравнение Лапласа примет вид [4]

$$\sigma_\kappa = \delta \frac{2\sigma_\theta}{d_n} = \delta \frac{\sigma_\rho}{d_n}.$$

Напряжение активного трения с использованием закона Кулона равно

$$\tau = f\sigma_\kappa = f\delta \frac{\sigma_\rho}{d_n}.$$

Если принять в первом приближении, что  $\tau$  по всей длине одинаково, то активная сила трения определяется:

$$F_{mp} = \pi d_n \tau = f \pi \delta \sigma_\rho h,$$

где  $h$  – высота вытянутой цилиндрической части. Усилие, которое носит опасное сечение, равно

$$P_{on} = \pi d_n \delta \sigma_\rho.$$

Если найти соотношение

$$\frac{F_{mp}}{P_{on}} = \frac{fh}{d_n},$$

то оно не должно превышать 1. В этом случае вытяжка происходит только активными силами трения. При  $f=0,15$  это произойдет, если высота вытянутой цилиндрической части будет не меньше 7 диаметров. В действительности  $h/d_n$  находится в пределах  $0,5 \div 1$ . Это снижает усилие вытяжки в опасном сечении на 10-15%.

Последнее обстоятельство уменьшает утонение заготовки в опасном сечении и увеличивает предельный коэффициент вытяжки, который может определяться или разрушением заготовки, или допустимым утонением.

В общем случае величина напряжений в опасном сечении в зависимости от коэффициента вытяжки может быть представлена в виде ряда Тейлора:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\rho_0} + \frac{\partial \sigma_{\rho_0}}{\partial K} (K - K_0) + \frac{\partial^2 \sigma_{\rho_0}}{2 \partial K^2} (K - K_0)^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\rho_0}$  – напряжение в опасном сечении при коэффициенте вытяжки  $K_0$ .

Для коэффициентов вытяжки, близких к  $K_0$ , в выражении (1) оставим только первых два числа:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\rho_0} + \frac{\partial \sigma_{\rho_0}}{\partial K} (K - K_0).$$

Отсюда найдем предельный коэффициент, приравняв напряжение  $\sigma_{\rho}$  к тому напряжению  $\sigma_{\rho_{оп}}$ , которому соответствуют допустимое утонение в опасном сечении или разрыв:

$$K_{np} = K_0 + (\sigma_{\rho_{оп}} - \sigma_{\rho_0}) / \partial \sigma_{\rho_0} / \partial K. \quad (2)$$

Чтобы определить составляющие в выражении (2), проводят вытяжку с коэффициентом вытяжки  $K_0$  и замеряют толщину в опасном сечении. С учетом степенного закона упрочнения из равенств (14), (15) (см. работу 1) найдем напряжение в опасном сечении:

$$\sigma_{\rho_0} = \bar{A} \varepsilon^n \delta_0 (1 - \mu^2)^{\frac{1+n}{2}}. \quad (3)$$

Напряжение  $\sigma_{\rho_{оп}}$  находится по формуле (3), только деформация утонения берется равной допустимой  $\varepsilon_{\delta_{np}}$ . Заменим частную производную конечной разницей:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial K} = \frac{\sigma_{\rho_0} - \sigma_{\rho_1}}{K_0 - K_1},$$

где  $\sigma_{\rho_1}$  – напряжение в опасном сечении при коэффициенте вытяжки  $K_1$ .

Если принять  $K_1 = 1$ , то напряжение

$$\sigma_{\rho_1} = 0 \text{ и } \frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial K} = \frac{\sigma_{\rho_0}}{K - 1}.$$

Выражение (2) представляется в виде

$$K_{np} = K_0 + (\sigma_{\rho_{оп}} - \sigma_{\rho_0})(K_0 - 1) / \sigma_{\rho_1}. \quad (4)$$

Здесь напряжения  $\sigma_{\rho_{оп}}$ ,  $\sigma_{\rho_0}$  находятся по формуле (3) при деформациях утонения  $\varepsilon_{\delta_0}$ ,  $\varepsilon_{\delta_{np}}$ .

### **Оборудование, оснастка, материалы, приборы**

Работа проводится с использованием силового гидравлического оборудования усилием 4000 или 1600 кН. Оно имеет манометры давления, по которым определяются усилия процессов путем перемножения давления на площадь плунжеров. Данные площадей дает преподаватель.

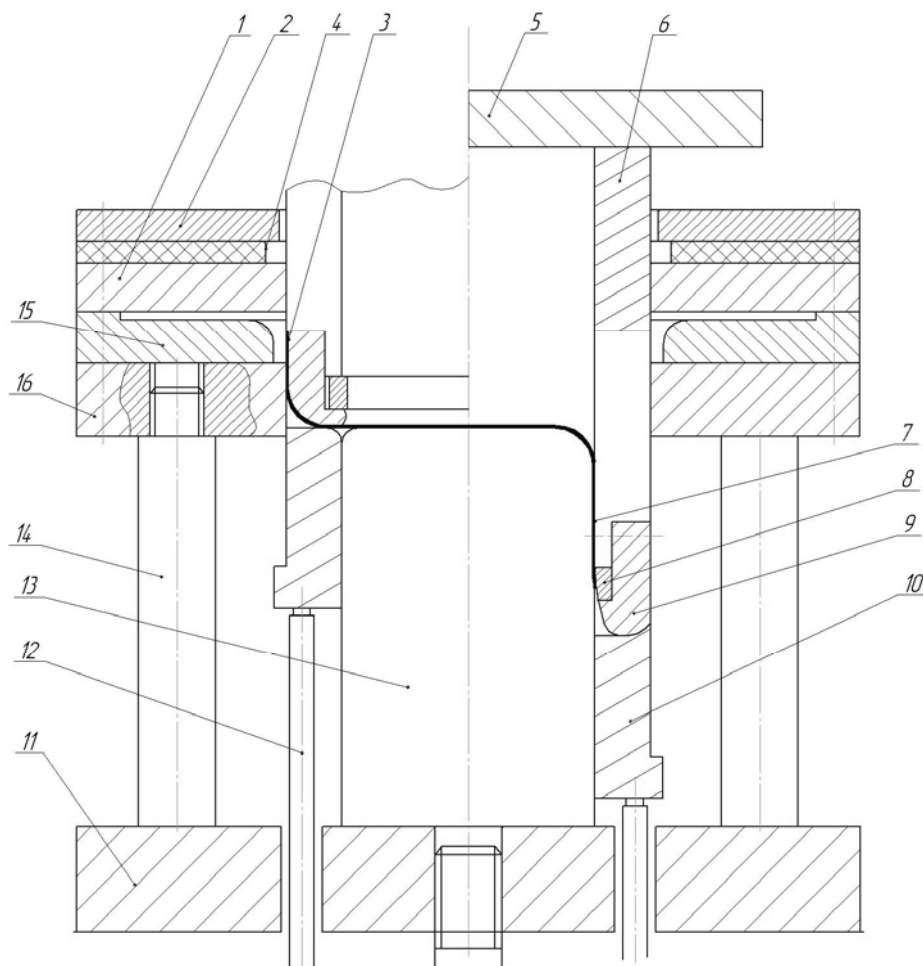


Рис. 3. Штамп совмещенной вытяжки 1-го и 2-го рода переходов

Закрытые высоты прессов, их ход и размеры столов позволяют использовать крупногабаритную штамповую оснастку с закрытой высотой до 450 мм и величиной хода до 400 мм. Гидропресс усилием 4000 кН можно использовать при таких параметрах, когда процесс вытяжки проводится ступенями с величиной хода 150 мм. Столы прессов имеют отверстия для применения буферных устройств к штампу, оба пресса простого действия.

В качестве оснастки используют штамп совмещенной вытяжки 1-го и 2-го переходов (рис. 3). Он состоит из плоских кольцевых прижимов 1,2, эластичного кольца 4, верхней 5 и нижней 11 плит, пуансонодержателя 6, упругого кольца 8, пуансона-матрицы 9, прижима 10, выталкивателей 12, пуансона 13, стоек 14, матрицы 15, болтов 16.



Штамп работает следующим образом. Плоская заготовка устанавливается в матрице 15 и прижимается к ней деталью посредством затягивания болтов 16, которые передают усилие прижима через кольцо 2 и эластичный материал 4. При движении пуансона-матрицы 9 вниз производится вытяжка цилиндрической заготовки 3. При дальнейшем движении вниз производится реверсивная вытяжка цилиндрической заготовки 3 в деталь 7. Во избежание складкообразования заготовка прижимается к пуансону-матрице 9 деталью 11. В момент вытяжки цилиндрической части детали 7 упругое кольцо 8 охватывает заготовку и прижимает ее к пуансону 13, создавая активные силы трения.

Важным при проектировании штампа являются размеры упругого кольца, внутренний диаметр кольца должен быть таким, чтобы и в начальный момент не создавать дополнительные напряжения в опасном сечении, а оказывать положительное действие, т.е. создавать только активные силы трения. Для этого необходимо, чтобы внутренний диаметр кольца был бы равен сумме диаметра пуансона плюс удвоенная фактическая толщина заготовки в зоне сопряжения радиусной и цилиндрической частей детали:

$$d_k = d_n^{-\Delta_1} + 2\delta^{-\Delta},$$

где  $d_n$  – диаметр пуансона;

$\delta$  – номинальная толщина заготовки;

$\Delta_1$  – минусовой допуск на изготовление пуансона;

$\Delta$  – минусовой допуск на толщину листа.

Величина максимальной упругой деформации кольца зависит от свойств металла и определяется по закону Гука:

$$\varepsilon_{упр} = \frac{\varepsilon_{упр}}{E},$$

где  $\varepsilon_{упр}$  – величина предела упругости материала;

$E$  – модуль упругости металла. Величину упругой деформации можно определить:

$$\varepsilon_{упр} = \frac{\Delta d_k}{d_k}.$$

Отсюда

$$\Delta d_k = \varepsilon_{упр} d_k.$$

Для отсутствия принудительного утонения упругая деформация кольца должна превышать разнотолщинность, полученную при "чистой" вытяжке. Однако наличие давления сказывается на толщине заготовки тем сильнее, чем больше давление кольца. Необходимо следить, чтобы

деформация кольца не превышала максимальной упругой деформации. Чтобы этого не произошло, кольцо должно иметь ограничение по раздаче. Величина максимального давления кольца определяется по уравнению

$$\sigma_k = \frac{2\delta_k}{d_k} \sigma_{упр} = \frac{4\delta_k}{d_k^2} (\delta - \delta^\Delta) E.$$

Для того чтобы толщина и ее поверхность были качественными, необходимо иметь высоту кольца (8-10)  $\delta$ , т.е. такой, как это делается на операции вытяжки с утонением.

Упругое кольцо должно располагаться сразу после радиуса закругления матрицы (перетяжного ребра). Заходная часть кольца должна иметь радиус закругления на половину толщины. В качестве материала следует использовать пружинные стали марок сталь 65, сталь 65Г, 30 ХГСА и сплавы типа БрБ2.

Замер толщин детали и заготовки проводится индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Материалом для вытяжки служат алюминиевые и медные листы толщиной 1,2 мм.

### ***Порядок выполнения работы***

Работа проводится бригадами студентов по 2-3 человека. Каждая бригада проводит исследования из четырех разных материалов, заготовок. Константы материала  $\bar{A}$ ,  $n$ ,  $\mu$ , усилие прижима,  $\varepsilon_{\delta_{np}}$  задаются преподавателем. Перед вытяжкой на заготовку наносят диаметральною линию.

1. Исследуется влияние сил трения на разнотолщинность заготовки при последующем переходе вытяжки.

2. Устанавливается заготовка в штамп, фиксируется прижимом и производится 1-я операция вытяжки из двух одинаковых заготовок.

3. Полученные цилиндрические заготовки удаляются из штампа и размечаются по диаметральной линии на отрезки, равные 8-10 мм.

4. Замеряется толщина цилиндрической заготовки. Данные заносятся в табл. 1.

5. Производится вторая операция вытяжки. Прижим 6 снят. После снятия заготовки в тех сечениях производится замер толщины вдоль образующей. Вторая операция вытяжки проводится с упругим кольцом и без него.

6. Рассчитывается предельный коэффициент вытяжки по формуле (4).

### ***Содержание отчета***

1. Схемы процесса вытяжки и напряженно-демпфированного состояния.

2. Результаты эксперимента по замеру толщин после 1-го и 2-го переходов и расчетные данные.

3. Результаты расчета предельного коэффициента вытяжки.

В отчете необходимо сопоставить данные исследований каждой бригады и сделать вывод о влиянии активных сил трения на величину утонения и предельный коэффициент.

### ***Вопросы для закрепления материала***

1. Какое влияние на величину утонения оказывают активные силы трения при вытяжке?

2. Какое влияние на величину утонения оказывают реактивные силы трения при вытяжке?

3. Почему при вытяжке на последующих переходах коэффициент вытяжки значительно меньше, чем на первом?

4. Как влияет на процесс вытяжки упругое кольцо в зоне рабочего пояса матрицы?

5. Как определить величину зазора между матрицей и пуансоном?

6. Из какого условия определяются размеры заготовки при вытяжке?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИМА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ С ДНОМ**

**Цель работы** – получение деталей с минимальной разнотолщинностью.

#### **Задачи**

Выявить особенности процесса обжима цилиндрической заготовки с дном.

Установить основные параметры, влияющие на разнотолщинность детали.

Отштамповать деталь заданной геометрической формы с минимальной разнотолщинностью.

Рассчитать коэффициенты уравнения регрессии изменения толщины детали.

#### **Механизм процесса обжима цилиндрической заготовки с дном**

Обжим – это операция, предназначенная для уменьшения поперечных размеров краевой части полой цилиндрической заготовки.

Схема процесса обжима и напряженно-деформированного состояния представлена на рис. 1. Вытянутая цилиндрическая заготовка 3 формируется в матрицу 2 путем приложения деформирующего усилия в торец заготовки. Удаление штампованной детали производится выталкивателем 1. Рабочая поверхность матрицы имеет профиль, соответствующий профилю детали [11, 12].

По характеру деформирования заготовку можно условно разбить на 4 участка:

I – упругого изгиба;

II – свободного пластического изгиба;

III – обжима;

IV – цилиндрический участок для передачи осевого усилия.

В процессе деформации протяженность участков меняется. Участок обжима III увеличивается, а другие уменьшаются до нуля. Таким образом, очаг пластической деформации развивается в двух направлениях: в сторону цилиндрического участка IV и в сторону участков дна I, II. Поэтому деформация в широтном направлении  $\varepsilon_\theta$  неодинакова по длине образующей и имеет следующий характер: минимальное значение – на участках дна заготовки I, II, на цилиндрическом участке IV; максимальное значение – промежуточных элементах участка III.

В меридиональном направлении элементы заготовки подвергаются немонотонной пластической деформации II. В начальный момент деформирования на элемент заготовки (заштрихованный элемент) действуют только напряжения подпора от изгиба свободного участка II. Величина этих напряжений близка к нулю. Поэтому элемент заготовки удлиняется в меридиональном направлении. В промежуточных стадиях деформирования за счет поступления новых элементов дна заготовки в участок обжима на выделенный элемент действуют напряжения подпора от их суммы. При выполнении условия  $\sigma_p > 0,5 \sigma_s$  происходит укорочение рассматриваемого элемента в меридиональном направлении. Изменение направления деформации  $\varepsilon_p$  приводит к тому, что длина образующей заготовки остается без изменения и равной длине образующей детали. Это равенство практически не зависит от параметров процесса обжима, поэтому можно считать, что разнотолщинность детали определена тангенциальной деформацией при обжиге вытянутой заготовки и зависит от условий вытяжки.

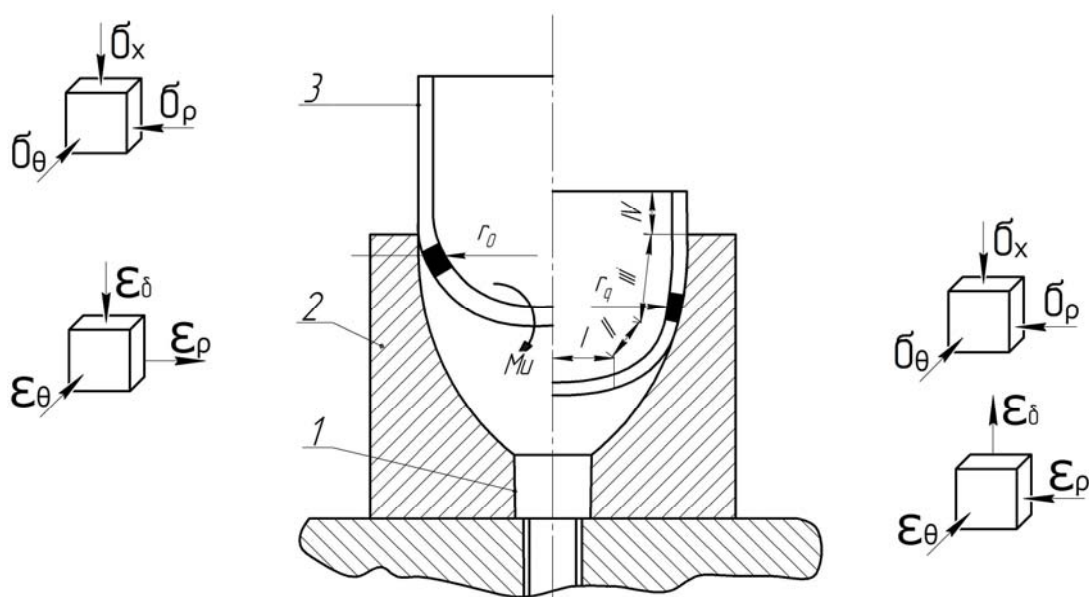


Рис. 1. Схема процесса обжима

При обжиге происходит неравномерное утолщение стенок заготовки. Эффективное сочетание операций вытяжки и обжима дает возможность получать изделия высокого качества, т.е. минимальной разнотолщинности, практически без потерь металла.

Предельные параметры процесса обжима ограничены потерей устойчивости заготовки в ее цилиндрической части. Условием неустойчивости является равенство радиального напряжения пределу текучести материала заготовки  $\sigma_p = \sigma_s$ .

### ***Оборудование, оснастка, материалы, приборы***

В качестве силового оборудования используется криволинейный пресс К-30 усилием 300 кН. Для замера усилия процесса используется тензометрическая аппаратура. Система тензометрирования состоит из месдозы – упругого элемента, который устанавливается под обжимной штамп (рис. 2), месдоза выполнена в виде стакана. На внутреннюю поверхность месдозы крепятся клеем БФ 2 тензодатчики: один – рабочий, другой компенсационный, которые входят в электрическое устройство для преобразования и усиления сигнала (рис. 3). Устройство соединено в виде моста, в который включены рабочие и компенсационные датчики. Рабочие датчики наклеены так, что деформация месдозы (сжатия) вызывает деформацию рабочих датчиков. Компенсационные датчики остаются без изменения. Перемещения датчиков происходят только в упругой области. При деформации рабочих датчиков в упругой области происходит разбаланс моста, с которого снимается сигнал в виде напряжения. Этот сигнал увеличивается в усилителе ТА-5 и регистрируется в шлейфовом осциллографе типа МН-02 или приборах типа ЭПП, ЭПД. Сравнивая полученный сигнал с тарировочным графиком, определяем величину усилия в процессе обжима.

Обжим заготовки I проводится в матрице 2 (см. рис. 1), контур рабочей поверхности которой соответствует контуру головной детали. Усилие в торец цилиндрической заготовки передается непосредственно верхней траверсой процесса. Заготовкой для обжима служит цилиндрический стакан, полученный на операции вытяжки. Замер толщины детали производится установленным на стойке часовым индикатором с ценой деления 0,01 мм, обмер диаметров заготовки и детали – штангенциркулем.

### ***Порядок выполнения работы***

Исследования процесса обжима проводятся бригадами в 2-3 человека.

1. Обжимают заготовки в одинаковых условиях, смазав матрицу минеральным маслом.
2. Замеряют толщины детали в сечениях по схеме, приведенной на рис. 7. Результаты испытаний сводятся в табл. 1, 2.
3. Рассчитывают коэффициенты уравнения регрессии с помощью ЭВМ.
4. Определяют максимальное усилие обжима.

### ***Содержание отчета***

1. Схемы обжима вытянутой заготовки и напряженно-деформированного состояния.

2. Результаты эксперимента по замеру толщин, представленные в виде табл. 1, 2.

3. Промежуточные данные по расчету коэффициентов в уравнениях регрессии (табл. 2).

4. Сделать выводы об оптимальном технологическом процессе с минимальной разнотолщинностью, включающем операции вытяжки плоской заготовки и последующего обжима; о влиянии схемы напряженно-деформированного состояния на усилия прессов обжима и вытяжки.

### ***Вопросы для закрепления материала***

1. В чем сущность процесса обжима?
2. Почему при обжиге усилие деформирования больше, чем при вытяжке?
3. Чем объясняется немонотонность процесса обжима полой цилиндрической заготовки с дном?
4. Чем ограничены предельные процессы обжима?
5. Как влияет сила трения на усилие процесса обжима?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

**Цель работы** – изучить механизм и установить схемы напряженно-деформированного состояния процесса раздачи осесимметричной заготовки.

### **Задачи**

Определить величины деформаций, полученных заготовкой, и установить схему деформированного состояния процесса.

Установить схему напряженного состояния процесса.

Определить предельный коэффициент раздачи.

### **Механизм процесса раздачи**

Раздача – процесс формообразования, при котором совокупность действия факторов приводит к следующей характерной схеме напряженно-деформированного состояния (рис. 1).

$$K_p = \frac{d_{кр}}{d_3}$$

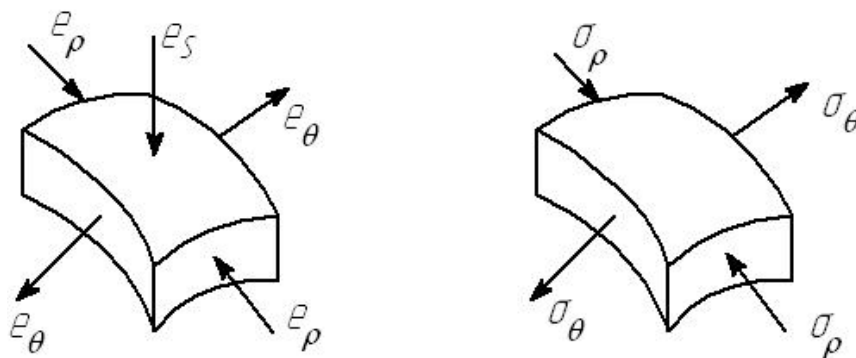


Рис. 1. Схемы напряжений и деформаций при раздаче в полярной системе координат

Процесс раздачи можно реализовать разными способами формообразования (рис. 2). Наглядно процесс раздачи связан с увеличением диаметров элементов заготовки ( $2r_3$ ) до максимального значения диаметра кромки ( $2r_{кр}$ ). Количественным показателем, характеризующим величину раздачи, является коэффициент раздачи. Это отношение диаметра кромки к диаметру заготовки:

$$K_p = \frac{d_{кр}}{d_3}$$



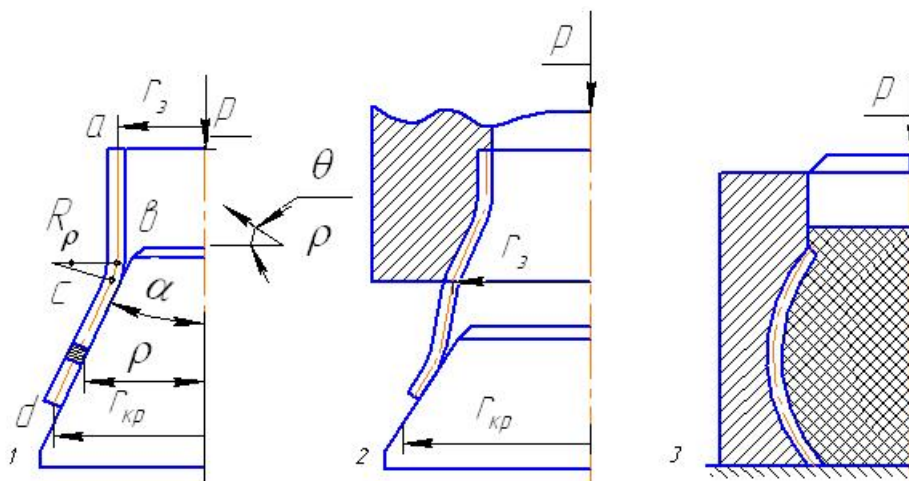


Рис. 2. Способы, реализующие процесс раздачи:

1 – раздача на конической оправке, 2 – последующая раздача на конической оправке, 3 – раздача эластичным наполнителем

При этом заготовку можно условно разбить вдоль образующей на три участка:

dc – основной участок пластической деформации;

cb – участок пластической деформации свободного изгиба;

ba – участок упругого деформирования, передающий усилие в зону пластической деформации.

При раздаче наиболее вероятно образование двух дефектов: потеря устойчивости в зоне радиусного перехода  $R_p$  (рис. 3) в результате гофрообразования либо разрыв кромки заготовки в результате исчерпания пластичности (рис. 4). Количественным показателем, определяющим величину максимально возможной раздачи, является предельный коэффициент раздачи. Им называется максимальный коэффициент раздачи, при котором заготовка деформируется без дефектов.

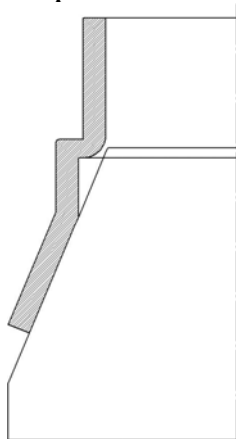


Рис. 3. Потеря устойчивости в результате гофрообразования

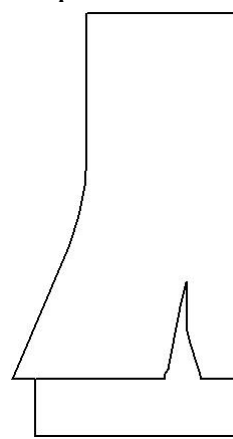


Рис. 4. Разрыв кромки заготовки

### Установление схем деформированного и напряженного состояния

При рассмотрении схем напряженно-деформированного состояния следует представить, что напряжения и деформации относятся к бесконечному элементу очага деформации. За такой элемент удобно взять бесконечно малый (б.м.) объем, ограниченный двумя плоскостями, проходящими через ось симметрии заготовки под углом  $d\theta$ . Это плоскости  $abcd$  и  $a'b'cd$ . Элемент ограничен также двумя поверхностями, проходящими через  $b'c'$  и  $b$  и  $a'd'a$  на расстоянии  $dl$ , перпендикулярными двум предыдущим плоскостям, и, наконец, двумя коническими поверхностями на расстоянии  $\delta$ , между которыми на расстоянии  $\delta/2$  от одной и другой находится срединная плоскость  $a'b'ba$ . В последнем случае за бесконечно малое расстояние принята толщина заготовки ввиду ее малости. Таким образом, б.м. элемент очага пластической деформации можно характеризовать напряжениями и деформациями в трех взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль образующей заготовки « $l$ », в тангенциальном направлении, т.е. по направлению касательной к окружности « $\theta$ », наконец, по направлению толщины заготовки « $\delta$ » (рис. 5).

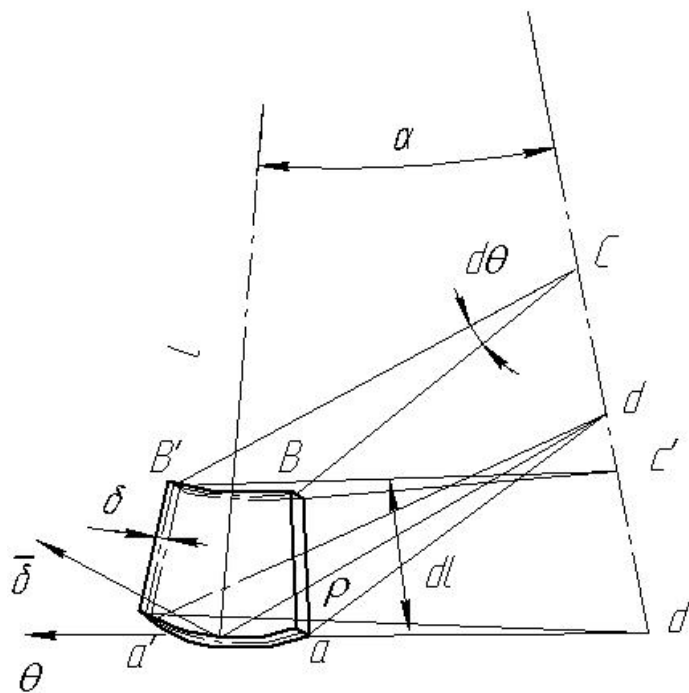


Рис. 5. Схема к установлению координат бесконечно малого элемента и направлений действия на него напряжений и деформаций

Ввиду малости толщины заготовки делается допущение, что все напряжения и деформации в направлении толщины заготовки не меняются и относятся к срединной поверхности. Другими словами, напряжения и деформации являются функциями только координаты « $l$ », т.к. в направлении  $\theta$  схема напряженно-деформированного состояния также не меня-

ется ввиду осевой симметрии. Местоположение рассматриваемого б.м. элемента наиболее просто установить в полярной системе с координатами  $\rho$  и  $\theta$  (рис. 5). Из геометрии видно, что координаты  $\rho$  и  $l$  связаны между собой углом « $\alpha$ ». Схему деформированного состояния наиболее просто установить, если определить радиусы и толщины элементов до и после деформации. Тогда деформации в тангенциальном направлении и по толщине равны:

в силу осевой симметрии по углу  $\theta$ :

$$e_{\theta} = \ln \left| \frac{\rho d\theta}{r_3 d\theta} \right| = \ln \left| \frac{\rho}{r_3} \right| = \ln \left| \frac{d}{d_3} \right|, \quad (1)$$

деформация по толщине:

$$e_{\varepsilon} = \ln \frac{\delta}{\delta_3}, \quad (2)$$

где  $r_3, \rho$  – координаты рассматриваемого элемента до и после деформации;  $\delta_3, \delta$  – толщина рассматриваемого элемента до и после деформации.

Третью деформацию находим из условия постоянства объема:

$$e_l = -e_{\delta} - e_{\theta}, \quad (3)$$

где  $e_l$  – деформация вдоль образующей заготовки.

Чтобы установить схемы напряжённого состояния, достаточно выявить соотношение напряжений, используя уравнение связи напряжений и деформаций. Для изотропного материала имеем:

$$\frac{\sigma_l}{\sigma_{\theta}} = \frac{1 + 2 \frac{e_l}{e_{\theta}}}{1 - 2 \frac{e_l}{e_{\theta}}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_l, \sigma_{\theta}$  – напряжения вдоль образующей заготовки и в тангенциальном направлениях.

Соотношение (4) приведено из условия, что напряжение  $\sigma_{\delta}$ , действующее в направлении толщины, равно нулю из-за его малости. Это условие можно подтвердить, проводя следующие расчеты:

$$\sigma_{\delta cp} = \frac{P_{\max} \cdot \sin \alpha}{F_K}, \quad (5)$$

$$\sigma_{l cp} = \frac{P_{\max}}{F_c}, \quad (6)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное усилие раздачи;

$F_K = \pi \frac{d_{кр}^2 - d_3^2}{4 \sin \alpha}$  – горизонтальная проекция площади контакта между заготовкой и оправкой (рис. 6);

$F_C = \pi d_3 \delta$  – площадь сечения заготовки, перпендикулярная вектору приложения силы  $P_{max}$ ;

$\sigma_{\theta ср}$ ,  $\sigma_{\ell ср}$  – средние величины напряжений по очагу деформации в направлении толщины и по длине образующей заготовки.

Разделив (5) на (6), получим:

$$\frac{\overline{\sigma_{\delta ср}}}{\overline{\sigma_{\ell ср}}} = \frac{d_3 \cdot \delta}{d_{кр}^2 - d_3^2} \ll 1. \quad (7)$$

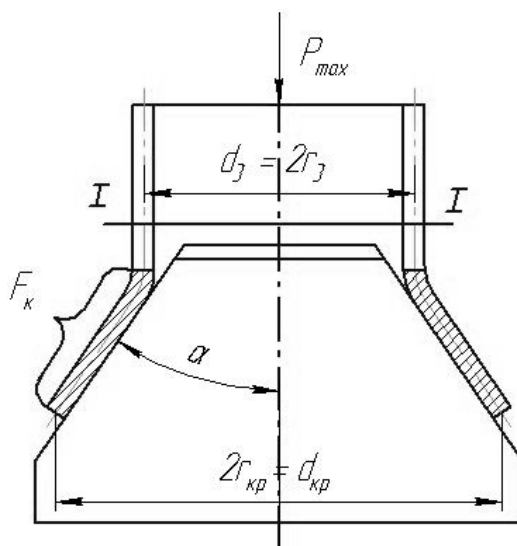


Рис. 6. Схема действия сил

### **Порядок выполнения работы**

Изучение процесса раздачи производится с использованием способа раздачи на конической оправке (рис. 6). Заготовкой является цилиндрическая тонкостенная труба. Перед деформацией производят замер её наружного диаметра, толщины. Замер и разметку производят с помощью штангенциркуля, штангенрейсмуса и часового индикатора. Раздачу производят на конической оправке с использованием гидропресса ЦДМПУ-30. Угол конусности оправки замеряют угломером. Оправку устанавливают на нижнюю плиту пресса, усилие передают через верхнюю плиту пресса. Окончание процесса определяют по началу образования дефекта: либо трещины на кромке, либо гофра в зоне радиусного перехода. В этот момент с силоизмерителя снимаются показания усилия.

После окончания деформирования проводят замер линейных размеров: толщины и диаметров кольцевых элементов в четырех сечениях, по приведенной схеме. Полученные величины заносят в табл. 1, 2.

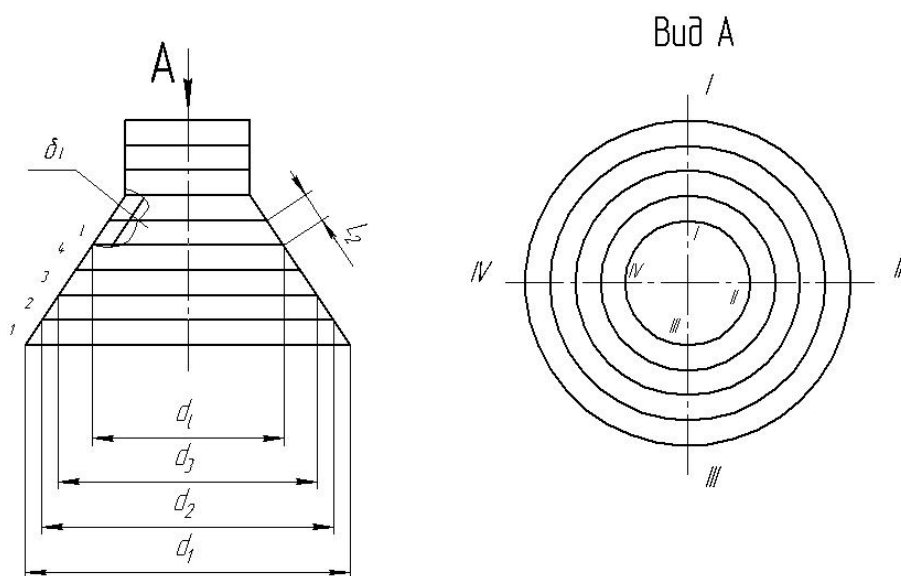


Рис. 7. Толщина и диаметр кольцевых элементов в четырех сечениях

Таблица 1. Результаты замеров толщин

$N_C$	$N_K$				
	1	2	3		$i$
I-I					
II-II					
III-III					
IV-IV					
Среднее значение					

Здесь  $N_K$  – номер кольца,  $N_C$  – номер сечения.

По результатам замеров устанавливают погрешность измерений. Для этого в табл. 1,2 выбирают столбцы, в которых имеет место наибольший разброс результатов. Рассчитывают среднеквадратичную погрешность:

$$\Delta S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{cp})^2}{n(n-1)}}, \quad (8)$$

где  $n$  – число замеров одного кольца ( $n = 4$ ).

**Таблица 2. Результаты замеров диаметров**

$N_C$	$N_K$				
	1		$i$		$n$
I-I					
II-II					
III-III					
IV-IV					
Среднее значение					

Определяют доверительный интервал результатов:

$$\Delta = t_\alpha \cdot \Delta S, \quad (9)$$

где  $t_\alpha$  – коэффициент Стьюдента (при  $n = 4$ , надежности  $\alpha = 0,9$ ,  $t_\alpha = 2,4$ ).

Истинное значение с учетом принятой надежности:

$$d = d_{cp} \pm \Delta, \quad (10)$$

где  $d_{cp}$  – среднее значение диаметра.

По найденным величинам рассчитывают деформации, используя формулы (1), (2), (3), результаты заносят в табл. 3.

**Таблица 3. Величины деформаций**

Деформация	$N_K$				
	1		$i$		$n$
$e_\sigma$					
$e_\theta$					
$e_l$					

Используя формулы (5), (6), убеждаются в соотношении (7). Рассчитывают соотношения напряжений (4) и результаты заносят в табл. 4.

**Таблица 4. Значение соотношений напряжений**

Напряжение	$N_K$				
	1		$i$		$n$
$\sigma_\ell / \sigma_\theta$					

Рассчитывают по средним значениям деформаций. Предельный коэффициент находят из соотношения

$$K_p = \frac{d_{kp}}{d_3}.$$

Полученные результаты представить в виде графиков деформаций и соотношения напряжений. Найти среднюю толщину и длину образующей детали.

***Вопросы для закрепления материала***

1. В чем сущность процесса раздачи?
2. Каковы виды брака при раздаче?
3. Какова схема напряженно-деформируемого состояния при раздаче?
4. Из какого условия определяются предельные возможности процесса раздачи?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБЖИМА, РАЗДАЧИ, ОТБОРТОВКИ

**Цель работы** – получение глубоких усеченных конусных деталей с заданной разнотолщиной.

### **Задачи**

Установить механизм, схемы напряженно-деформированного состояния совмещенных процессов обжима, отбортовки, раздачи.

Выявить основные параметры, влияющие на разнотолщину детали.

Установить основные параметры штамповки деталей с заданной разнотолщиной.

Рассчитать коэффициенты уравнения регрессии, описывающей изменение толщины детали.

### **Механизм совмещенных процессов обжима, раздачи, отбортовки**

Для совмещенных процессов обжима, раздачи, отбортовки используется заготовка, полученная на операции вытяжки (см. работу №2). Представляет она собой оболочку, имеющую цилиндрический участок, сопряженный по радиусу с дном, в центральной части которого имеется отверстие с диаметром  $d_0$ . Со стороны торца большего основания цилиндрическая часть оболочки сопряжена также по радиусу с фланцем [13, 14]. Заготовка устанавливается на оправку 3 (рис. 1).

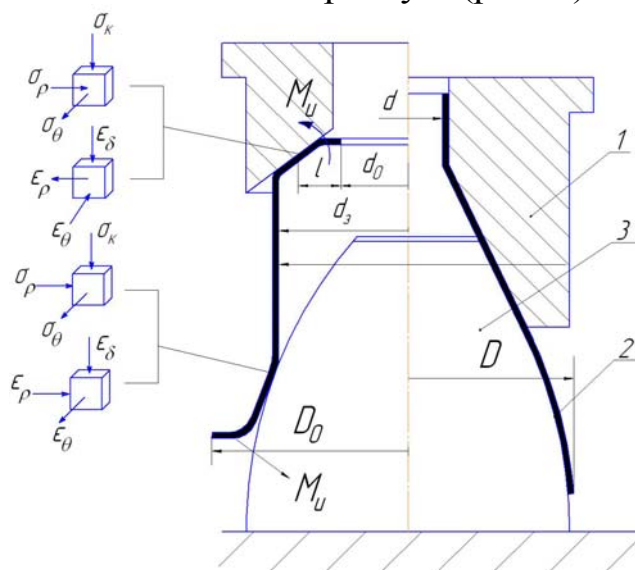


Рис. 1. Схема совмещенных процессов обжима, раздачи, отбортовки:  
1 – пуансон-матрица; 2 – деталь; 3 – оправка



Процесс штамповки начинается при соприкосновении пуансона-матрицы 1 с заготовкой. При этом одновременно происходит следующее. Цилиндрическая часть и плоское дно обжимаются, создавая в зоне контакта заготовки с пуансоном-матрицей схемы «чистого» обжима. Одновременно за счет разницы напряжений по толщине заготовки в зоне, близкой к кромке, создаются изгибающие моменты –  $M_u$ , которые выворачивают дно наружу. Длину образующей, по которой действуют изгибающие моменты, можно в 1-м приближении определить по формуле А.А. Ильюшина  $l = \sqrt{2\delta d_0}$ .

При выворачивании дна происходит отбортовка кромки отверстия, т.е. увеличение исходного диаметра  $d_0$  до размеров  $d$ .

В результате обжима и отбортовки в цилиндрической части заготовки создаются напряжения, усилие от которых уравнивается усилием, создаваемым при деформировании другой ее части, прилегающей к открытому торцу большего диаметра. При этом происходит раздача этой части заготовки преимущественно по радиусу сопряжения цилиндрической части и фланца. Одновременно происходит обжим торцевой части за счет действия изгибающих моментов. Следует отметить, что при отбортовке схема напряженно-деформированного состояния такая же, как и при раздаче, только напряжение  $\sigma_K = 0$ . При обжиге торца большего диаметра схема напряженно-деформированного состояния аналогична схеме обжима цилиндрической части, но только  $\sigma_K = 0$ .

Детали рассмотренного типа находят применение в двигателях летательных аппаратов в качестве камер сгорания. Совмещение операций позволяет штамповать детали за 2-3 перехода, в отличие от базовых технологий, основанных только на вытяжке, которые включают 7-10 переходов. Особенностями деталей камер сгорания является то, что штампованная деталь представляет собой полуфабрикат для дальнейшей механической обработки. В целях экономии металла небезразлично, как меняется толщина заготовки вдоль образующей заготовки. Если изменение толщины стенки готовой детали аппроксимировать в 1-м приближении многочленом 1-й степени, то эпюры изменения толщины стенки можно свести к трем видам (рис. 2): постоянный, переменный с уменьшением толщины к меньшему основанию, переменный с увеличением толщины к меньшему основанию. Для получения деталей с эпюрами изменения толщины заготовки 1-й и 2-й групп необходимо подбирать соответствующим образом коэффициент обжима ( $K_0 = \frac{d_3}{d}$ ). Чем больше  $K_0$ , тем больше набор толщины. Однако кромка при отбортовке диаметра

меньшего основания утонится. Чтобы ликвидировать это, можно применить дополнительный обжим. В этом случае имеется возможность получить толщину заготовки, которая увеличивается к меньшему основанию.

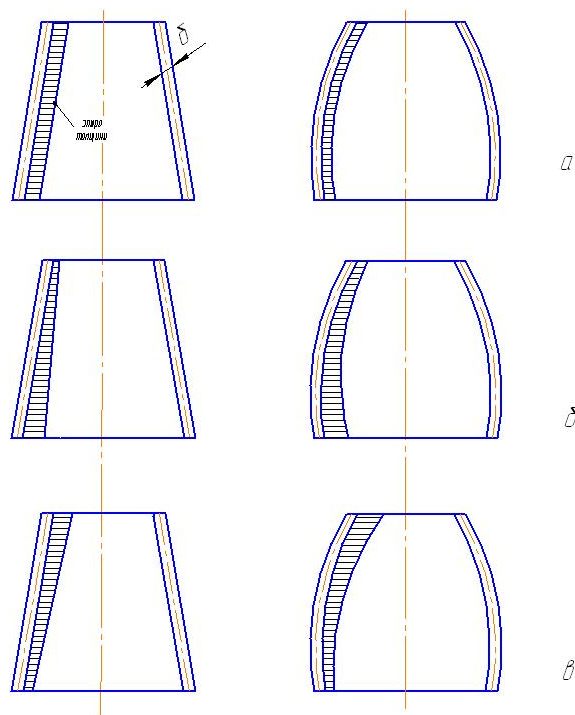


Рис. 2. Эпюры изменения толщины стенки деталей камер сгорания в трех видах: а – постоянный; б – переменный с уменьшением толщины к меньшему основанию; в – переменный с увеличением толщины к меньшему основанию

### ***Оборудование, оснастка, материалы, приборы***

В качестве оборудования используется гидравлический пресс усилием 4000 кН (см. работу № 2). Заготовку получают вытяжкой в штампе, который совмещает 1-й и 2-й переходы. Причем вытяжку 2-го перехода проводят не до конца, а оставляют фланец.

Штамповку производят на оснастке, включающей пуансон-матрицу I, оправку 2 (рис. 1). Обе эти детали имеют рабочую поверхность, соответствующую поверхности детали. Замер толщины производится индикатором часового типа, диаметров – штангенциркулем. В качестве материала заготовок используют алюминиевые сплавы. Заготовки имеют разные диаметры отверстия и фланца.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Бригада студентов по 2-3 человека замеряет размеры детали: диаметры фланца, диаметр отверстия в плоском дне, толщину заготовки в различных сечениях по диаметральной линии с шагом 8-10 мм. Замеры толщин сводят в табл. 1, 2.

2. Проводят совмещенный процесс обжима, раздачи, отбортовки до полного прилегания обеих кромок заготовки к рабочим поверхностям детали.

3. Замеряют толщины заготовки в различных сечениях. Замер толщин кромок проводить на расстоянии 1-1,5 толщины от кромки.

4. Обрабатывают результаты замера толщин, рассчитав на ЭВМ коэффициенты регрессии.

### ***Содержание отчета***

1. Привести схемы напряженно-деформированного состояния совмещенного процесса.

2. Результаты замеров и расчета толщин свести в табл. 1, 2.

3. Сделать выводы о влиянии геометрических параметров процесса на величину и характер изменения толщины заготовки. Выявить возможности направленного изменения толщины деталей.

### ***Вопросы для закрепления материала***

1. Перечислите преимущества совмещенных процессов по сравнению с отдельными процессами.

2. Каков характер изменения толщины полученной детали?

3. Чем ограничены предельные возможности совмещенного процесса?

4. Обосновать изменение длины образующей детали.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

**Цель работы** – исследование процесса формовки.

### **Задачи**

Выявить механизм процесса и определить схему напряженно-деформированного состояния процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей из конических заготовок.

Обосновать процесс формовки.

Определить основные параметры процесса:

- размеры заготовки;
- усилие процесса.

### **Механизм процесса формовки**

В производстве изделий ракетно-космической техники находят применение достаточно глубокие ( $\frac{H}{D} > 0,5$ ), крупногабаритные, тонкостенные ( $\frac{S_{заг}}{D} \leq 0,008$ ) 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.

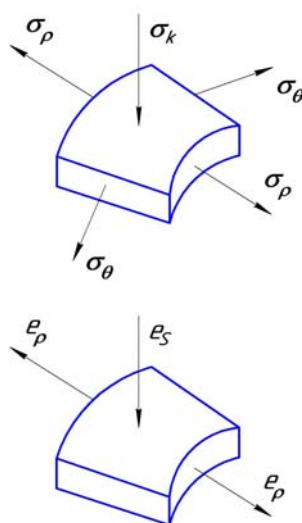


Рис. 1. Схема всестороннего растяжения

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

Устройство предназначено для промышленного гидравлического пресса двойного действия с гидроподушкой типа П233 и состоит из (Пат. 78709 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>В21D20/30; Пат. 58055 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>В21D22/30; Пат. 102543 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>В21D22/30) 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 усеченного конуса заготовки 8. Усилие прижима 10 передают с помощью шпильки 11.

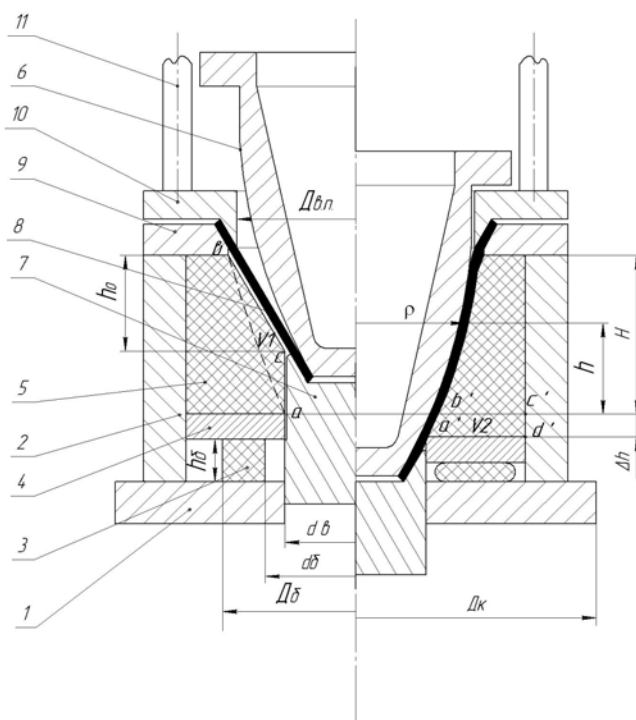


Рис. 2. Устройство для формообразования (слева от оси в открытом, а справа от оси в закрытом положении)

### ***Обоснование процесса формовки***

Коническая усеченная заготовка 8 устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 9, а прилегающими к торцу меньшего основания – на выталкиватель 7. За-

тем 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, совпадающую с конусностью заготовки. При движении на пуансон действует усилие, равное суммарному усилию, создаваемому 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  $\Delta abc$ , 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:

$$V_2 = \frac{\pi(D_k^2 - d_э^2)}{4} \Delta h, \quad (1)$$

где  $D_k, d_э$  - соответственно диаметры контейнера и выталкивателя;  
 $\Delta h$  - высота перемещенного смещенного объема.  
 Объем смещенной части эластичного наполнителя:

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

Объем большого усеченного конуса:

$$V_{бк} = \frac{\pi}{12} H (D_{эп}^2 + D_{эп} d_э + d_э^2).$$

Объем цилиндра:

$$V_{цил.} = \frac{\pi}{4} d_э^2 (H - h_0).$$

Объем малого усеченного конуса:

$$V_{мк} = \frac{\pi}{12} h_0 (D_{эп}^2 + D_{эп} d_э + d_э^2).$$

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

где  $D_{эп}, d_э$  – 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,  $V_{\text{ок}}$  рассчитывается по формуле

$$V_{\text{ок}} = \pi \int_0^{H+\Delta h} \rho^2 dh, \quad (4)$$

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

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

$$\Delta h = \frac{4V_1}{\pi(D_k^2 - d_{\text{с}}^2)}. \quad (5)$$

Величина перемещения подкладной плиты равна величине сжатия эластичного буфера 2. Зная необходимое давление и величину активных касательных напряжений  $\tau$  на поверхности контакта заготовки с пуансоном, которые находят из решения задачи о возможном обрыве или условии заданного распределения толщины детали, определяют 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:

$$\frac{\pi(D_k^2 - d_{\text{с}}^2)}{4} q_{\text{с}} = \frac{\pi(D_{\text{б}}^2 - d_{\text{б}}^2)}{4} q_{\text{б}}, \quad (6)$$

где  $q_{\text{с}}, q_{\text{б}}$  – соответственно давления эластичного наполнителя и эластичного буфера;

$D_{\text{б}} = (0.75 - 0.8)D_k$  – наружный диаметр эластичного буфера;

$d_{\text{б}} = (0.75 - 0.8)d_{\text{с}}$  – 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:

$$q_{\text{б}} = q_{\text{с}} \frac{D_k^2 - d_{\text{с}}^2}{D_{\text{б}}^2 - d_{\text{б}}^2}. \quad (7)$$

По номограмме (В.П. Романовский. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971. С.644-645) с учетом найденного

значения  $q_{\delta}$  находят геометрические соотношения для применяемого материала эластичного буфера, а именно  $\frac{D_{\delta} - d_{\delta}}{h_{\delta}}$  (где  $h_{\delta}$  – высота эластичного буфера), а также величину деформации сжатия эластичного буфера  $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{\delta}}$ . Величина деформации сжатия дает возможность определить высоту эластичного буфера с учетом зависимости (5):

$$h_{\delta} = \frac{\Delta h}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Последнее выражение позволяет найти разницу диаметров:

$$D_{\delta} - d_{\delta} = \frac{\Delta h}{\varepsilon} \quad (9)$$

или

$$(0,15 - 0,8)D_k - (1,15 - 1,2)d_{\delta} = \frac{\Delta h}{\varepsilon}.$$

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

$$D_k = \frac{\frac{\Delta h}{\varepsilon} + (1,15 - 1,2)d_{\delta}}{(0,75 - 0,8)}. \quad (10)$$

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



$\sigma_\rho$ , уменьшая их в зоне наименьшего диаметра и увеличивая в зоне наибольшего диаметра. При этом можно считать, что напряжения  $\sigma_\rho$  вдоль образующей становятся постоянными и вычисляются по формуле

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

где  $\Pi$  – модуль упругости;

$\sigma_{To}$  – экстраполированный предел текучести;

$\mu$  – 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/с.

В качестве оснастки используют экспериментальный штамп (рис. 3). Абсолютные размеры штампа выбраны из следующих условий:

- вес штампа, удобный для проведения экспериментов (15 кг);
- относительные размеры заготовки  $\frac{S_{заг}}{D} < 0,008$ .

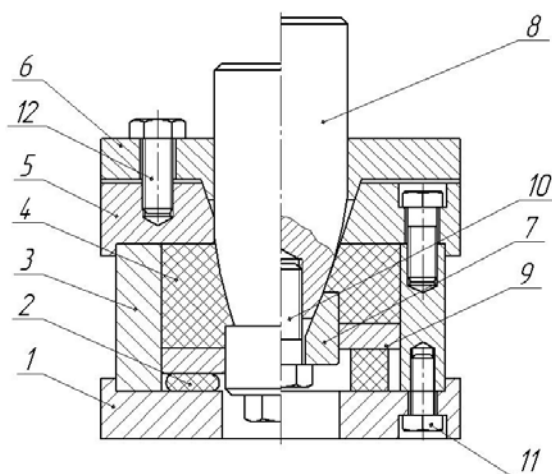


Рис. 3. Общий вид штампа: 1 – плита штампа; 2 – эластичный буфер; 3 – контейнер; 4 – эластичный элемент; 5 – матрица; 6 – прижим; 7 – выталкиватель; 8 – пуансон; 9 – подкладная плита; 10 – болт; 11 – винт; 12 – болт

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 усеченного 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, совпадающую 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  $E=30 \text{ кг/см}^2$ ). 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.

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

**Таблица 1. Механические свойства и константы упрочнения для стали 12X18H10T**

Материал	$\delta_p$	$\mu$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{ш}$ , МПа	$A$ , МПа	$n$	$\Pi$ , МПа	$\sigma_{T_0}$ , 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

Примечание:  $n$ ,  $A$  – показатели механических свойств материала;  $\sigma_{ш}$  – напряжения в момент появления шейки;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести.

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.

### **Порядок выполнения работы**

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

#### *1. Определяют размеры заготовки под развертку.*

Для построения развертки используется равенство длин окружностей большего и меньшего диаметров, образующей конической оболочки длинам дуг и высоте развертки (рис. 4):

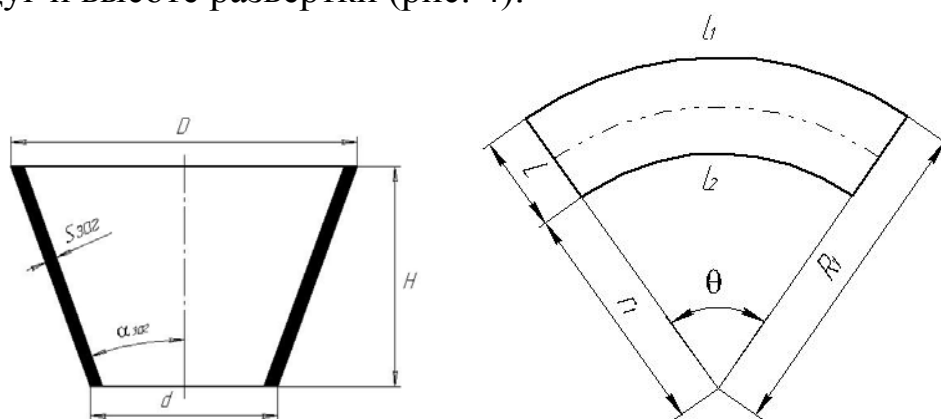


Рис. 4. Схема заготовки и развертки

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

где  $l_1$  и  $l_2$  – длины дуг;

$\theta$  – 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.

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 трех уравнений относительно  $R_1, r_1, \theta$ , 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 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.

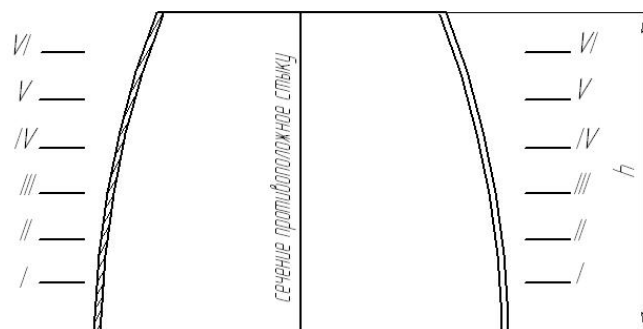


Рис. 5. Схема замеров детали выпуклой формы

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  $\Delta x$  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  $\alpha$ ;  $t = 2,02$  при  $\alpha = 90\%$  и  $n = 6$ . Заполняют таблицу замеров (табл. 2):

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

№ замера \ № сечения	1	2	3	4	5	6	Среднее значение толщины	Средне-квадрат. 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  $\sigma_r$  вычисляют по формуле (11).

Механические свойства материала берут из табл. 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:*

$$P_{\text{эспер}} = P_{\text{силоизмерителя}} - P_{\text{эл}},$$

где  $P_{\text{силоизмерителя}}$  – усилие, снятое с силоизмерителя;

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

*14. Сравнивают усилие процесса формовки экспериментального и теоретического значений.*

### ***Вопросы для закрепления материала***

1. Каков механизм процесса формовки из конической детали?
2. Какое влияние на распределение толщины получаемой детали оказывают активные силы трения?
3. Какое влияние на процесс формовки из конической заготовки оказывает эластичная среда?
4. В чем недостатки и преимущества конического прижима?
5. Как определить размеры конической заготовки?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТБОРТОВКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК**

**Цель работы** – исследование процесса отбортовки из кольцевой заготовки.

### **Задачи**

Выявить механизм процесса и определить схему напряженно-деформированного состояния процесса отбортовки тонкостенных осесимметричных деталей из кольцевых заготовок.

Обосновать процесс отбортовки.

Определить основные параметры процесса:

- $k_{пред}$  – предельный коэффициент отбортовки;
- максимальную относительную высоту;
- 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 (рис. 1).

Процесс реализуется коническим пуансоном, из плоской заготовки, фланец которой жестко зажат по периферийной части между матрицей и прижимом (рис. 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 раз-

рыва 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:

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

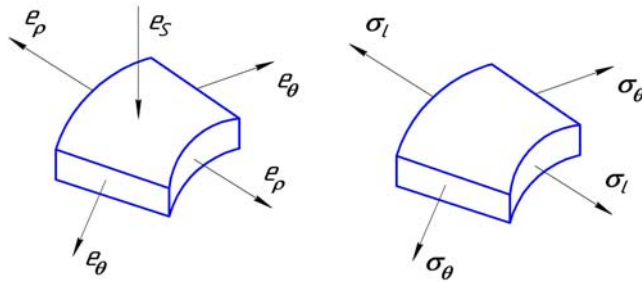


Рис. 1. Схема напряженно-деформируемого состояния плоского растяжения

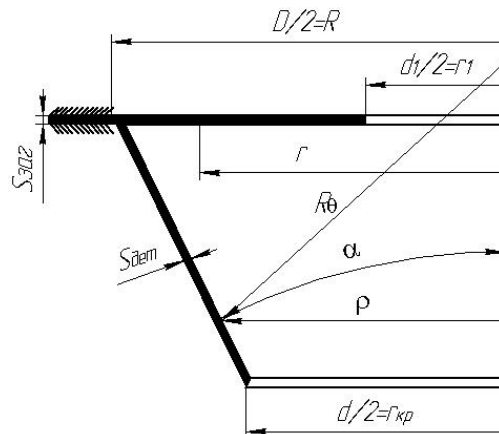


Рис. 2. Схема для определения соотношения координат элементов заготовки и детали:  $\rho$  – координата элемента на детали;  $R_\theta$  – радиус детали в тангенциальном направлении;  $\alpha$  - угол между осью и образующей полученной детали;  $S_{дет}$  – толщина детали вдоль образующей;  $S_{заг}$  – толщина заготовки;  $D$  – больший диаметр детали;  $d$  – меньший диаметр детали;  $d_1$  – диаметр отверстия в заготовке;  $r_{кр}$  – радиус кромки

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

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

Учитывая соотношения (1) и (2), имеем:



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

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

$$k_{пред} \leq \frac{d}{d_1} = (\psi_{ин} + 1)^2, \quad (3)$$

где  $\psi_{ин}$  – 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:

$$S_1 = a + b\rho, \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  - const.

Используя условие колокации, определим коэффициенты  $a$  и  $b$ ,

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

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

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

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

где  $r$  и  $\rho$  – координаты (см. рис. 2);

$\sigma_\rho$  – напряжения в меридиональном направлении;

$\sigma_\theta$  – напряжения в тангенциальном направлении.

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

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

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

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left\{ \frac{a}{(a + b\rho)(1 - f \operatorname{ctg} \alpha)} + \frac{b\rho}{(2 - f \operatorname{ctg} \alpha)(a + b\rho)} - \left( \frac{r_{кр}}{\rho} \right)^{1 - f \operatorname{ctg} \alpha} \right\} \times \left( \frac{a + br_{кр}}{(a + b\rho)} \right) \left\{ \frac{a}{(1 - f \operatorname{ctg} \alpha)(a + br_{кр})} + \frac{br_{кр}}{(2 - f \operatorname{ctg} \alpha)(a + br_{кр})} \right\}. \quad (8)$$

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

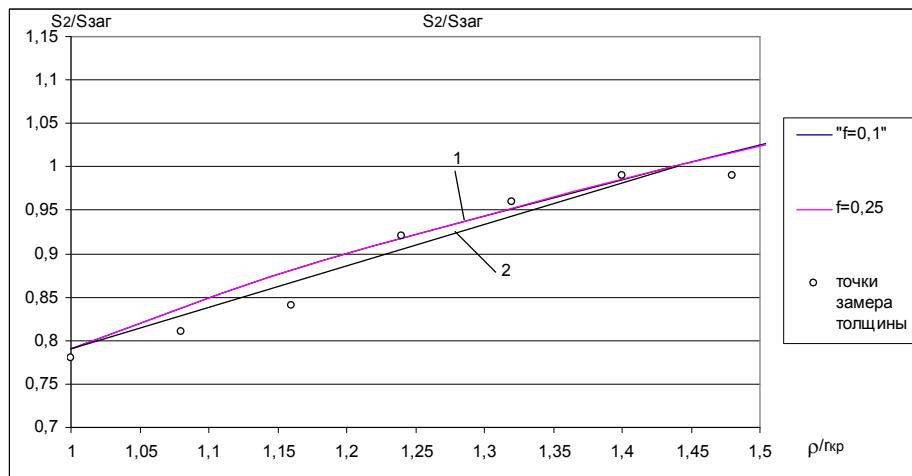


Рис. 3. График зависимости  $S_2/S_{заг}$  от  $\rho/r$ :  
1 – расчетная кривая; 2 – функция 1-го приближения

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

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

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

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 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/с.

В качестве оснастки используют экспериментальный штамп (рис. 4). Штамп состоит из подкладного кольца 4, находящегося на гидрорессе. На него размещают прижим 2 и матрицу 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.

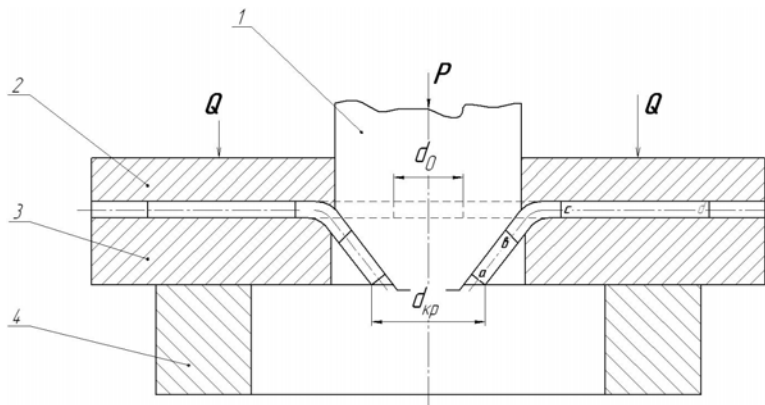


Рис. 4. Общий вид штампа: 1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; 4 – подкладное кольцо

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 константы упрочнения исследуемого материала приведены в табл. 1.

Таблица 1. Механические свойства и константы упрочнения для алюминия АД1

Материал	$\delta_p$	$\mu$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{ш}$ , МПа	$A$ , МПа	$n$	$\Pi$ , МПа	$\sigma_{T_0}$ , МПа
АД1 $S_{заг} = 0,345$ мм	0,215	0,5	44,76	77,92	94,67	121	0,16	362,11	44,03

Примечание:  $n$ ,  $A$  – показатели механических свойств материала;  $\sigma_{ш}$  – напряжения в момент появления шейки;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести.

### Порядок выполнения работы

Кольцевая заготовка с учетом размеров штамповой оснастки имеет размеры:  $D=180$  мм;  $d_1 D=30$  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.

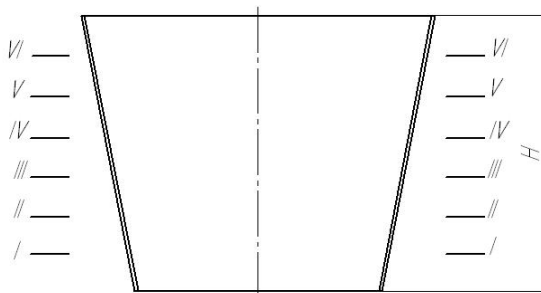


Рис. 5. Схема замеров детали конической формы

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

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

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  $\Delta x$  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  $\alpha$ ;  $t=2,02$  при  $\alpha=90\%$  и  $n=6$ . Заполняют таблицу замеров (табл. 2):

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

№ 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									

Делают вывод о характере изменения толщины вдоль образующей.

4. Рассчитывают коэффициент отбортовки и толщину кромки.

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

5. Определяют теоретические значения толщин детали вдоль образующей.

Замеряют в каждом из шести сечений радиус  $\rho$  и рассчитывают толщину детали:

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

Таблица 3. Теоретические значения толщины (мм) детали

№ сечения \ № замера	$\rho$ , 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 (табл. 3) второго приближения  $S_2$  вдоль образующей и сравнивают с экспериментальными данными при одной и той же координате  $\rho$  в шести сечениях. Находят относительное отклонение по

формуле в каждом сечении:  $\frac{S_2 - S_{\text{эксперим}}}{S_{\text{эксперим}}} \cdot 100\%$ .

7. *Определяют значение предельного коэффициента отбортовки.*

Используют формулу (3) и зависимость:  $\psi_{\text{ш}} = \frac{\delta_p}{1 + \delta_p}$ , где величина

$\delta_p$  берется по данным табл. 1.

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

### **Вопросы для закрепления материала**

1. Каков механизм схемы напряженно-деформируемого состояния при отбортовке?

2. Определить толщину кромки при отбортовке.

3. Обосновать изменение длины образующей детали.

4. Определить доверительный интервал при обработке результатов эксперимента.

5. Из какого условия определяются предельные условия отбортовки?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫРУБКИ, ГИБКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДЫ**

**Цель работы** – установление основных технологических параметров при штамповке листовых деталей с применением эластичной среды.

#### **Задачи**

Изучить механизм операций штамповки, вырубки, пробивки, гибки. Определить зависимость потребного давления от высоты формоблока при вырубке и от диаметра отверстия формоблока при пробивке. Установить зависимость угла пружинения от угла и радиусагиба.

#### **Механизм процессов**

Штамповка деталей с применением эластичной среды нашла наиболее широкое применение в производстве летательных аппаратов, что объясняется простотой и универсальностью штамповой оснастки. Для того чтобы сменить одну операцию другой (например: вырубку гибкой), достаточно поменять всего одну деталь – формоблок. Это обстоятельство позволяет значительно сократить время на подготовку производства, отладку штампового инструмента, что в условиях единичного или мелкосерийного производства, к которому и относится производство летательных аппаратов, имеет место значительный экономический эффект.

Штамповка с применением эластичной среды может производиться по трем схемам:

- 1) в эластичную матрицу жестким пуансоном;
- 2) в жесткую матрицу эластичным пуансоном;
- 3) в эластичную матрицу эластичным пуансоном.

В последнем случае пуансон и матрица выполнены из материала различной твердости.

Наибольшее распространение в промышленности получили первые две схемы.

#### **ОПЕРАЦИЯ ВЫРУБКИ**

Технологическая схема операции вырубки представлена на рис. 1. В момент соприкосновения эластичной среды с уложенной на формоблок заготовкой припуск материала огибается по всему контуру режущего блока. После соприкосновения с подштамповой плитой припуск защемляется между плитой и эластичной средой. В материале заготовки в зоне режущих кромок возникает сложная схема напряженного состояния с компонентами напряжений растяжения, сжатия касательных напряжений.

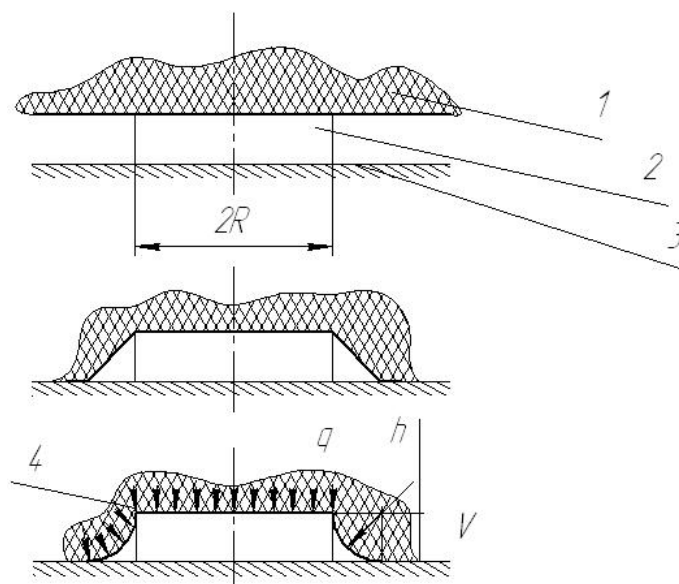


Рис. 1. Схема последовательности операции врубки: 1 – эластичная среда; 2 – формоблок; 3 – подштамповая плита; 4 – деталь

Момент разделения частей заготовки происходит на стадии разрушения, причиной которой является образование трещин в зоне режущих кромок. Этой стадии предшествует пластическая деформация с компонентами растяжения и сдвига. Ограничение величины пластической деформации обусловлено исчерпанием ресурса пластичности материала (критерием Колмогорова).

$$\psi = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{p_i}} = 1,$$

где  $d\varepsilon_i$  – приращение интенсивности деформации рассматриваемой части заготовки, зависящее от схемы;

$\varepsilon_{p_i}$  – интенсивность деформации разрушения для данного материала, зависящая от схемы напряженного состояния.

Наличие значительных растягивающих напряжений в рассматриваемой схеме приводит к тому, что исчерпание пластичности металла происходит при относительно небольших значениях накопленной интенсивности деформаций, чем при вырубке в инструментальном штампе. Относительно небольшая стадия пластической деформации в сравнении со стадией разрушения обуславливает невысокое качество реза. К недостаткам рассматриваемой схемы следует отнести низкий коэффициент использования материала из-за необходимости использования припуска, затрудненность применения средств механизации и автоматизации.

Основными технологическими параметрами при вырубке являются расчет давления эластичной среды и усилия. Они рассчитываются из ус-



ловия равенства внешней силы, необходимой для вырубки, силам внутреннего сопротивления заготовки:

$$P_{внеш} = P_{внутр}. \quad (1)$$

Силу сопротивления заготовки можно определить по приближенной формуле

$$P_{внутр} = \sigma_{\sigma} F_{среза} = 2\pi RS\sigma_{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\sigma}$  – предел прочности материала;

$S$  – толщина листа;

$R$  – радиус вырубаемой детали.

Внешняя сила рассчитывается по формуле

$$P_{внеш} = gF_{np}, \quad (3)$$

где  $g$  – давление, приложенное к эластичной среде;

$F_{np}$  – площадь проекции припуска на горизонтальную плоскость, свободного от контакта с формоблоком и подштамповой плитой.

Если в первом приближении считать, что форма свободной поверхности припуска соответствует четверти вогнутого сферического кольца, то ее площадь определяется равенством

$$F_{np} = \pi \left[ (R + h)\pi h - 2h^2 \right], \quad (4)$$

где  $h$  – высота формоблока.

После преобразований найденных соотношений (1)-(4) давление эластичной среды представляется формулой

$$g = \sigma_{\sigma} \frac{2R \cdot S}{\pi(R + h)h - 2h^2}. \quad (5)$$

Анализ последней зависимости показывает, что с увеличением высоты формоблока давление эластичной среды убывает (см. рис. 2) при одинаковых размерах детали.



Рис. 2. Зависимость давления эластичной среды от высоты формоблока

Усилие процесса, необходимое для выбора оборудования:

$$P_{об} = gF, \quad (6)$$

где  $F$  - площадь сечения эластичной среды, перпендикулярной направлению действия силы от оборудования.

### ОПЕРАЦИЯ ПРОБИВКИ

Механизм реза в операции пробивки аналогичен механизму реза в операциях вырубки. Определение основного технологического параметра – давления проводится на основе изложенной методики с использованием соотношений (1)-(3). Однако в соотношении (3) свободная площадь определяется соотношением (рис. 3)

$$F_{np} = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (7)$$

Соотношение (5) приводится к виду

$$g = \sigma_s \frac{2S}{R}. \quad (8)$$

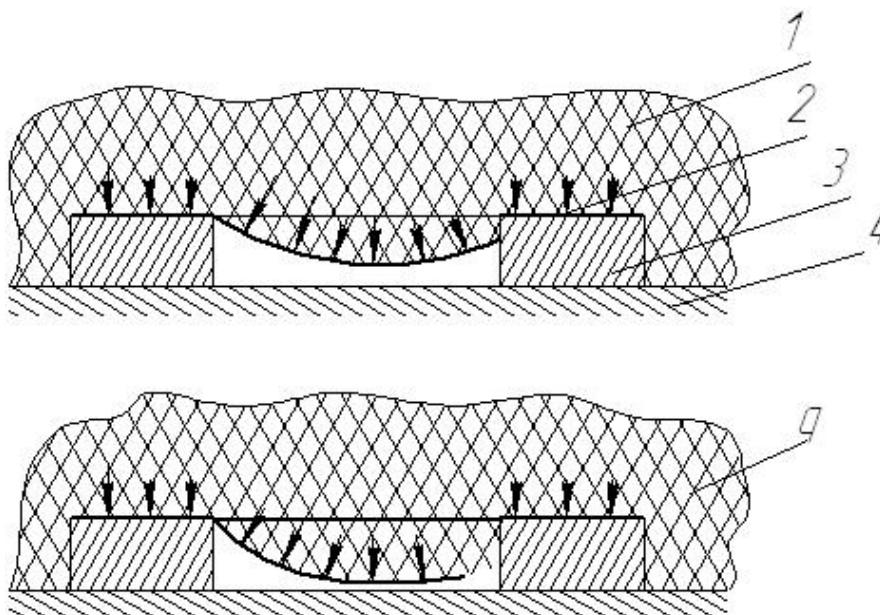


Рис. 3. Схема последовательности операции пробивки: 1 – эластичная среда; 2 – деталь; 3 – формоблок; 4 – подштамповая плита

Таким образом, с увеличением радиуса пробивки давление среды уменьшается. Это объясняется тем, что рост площади реза увеличивается в меньшей пропорции, чем площадь поверхности, которая определяет внешнюю силу (см. рис. 4).

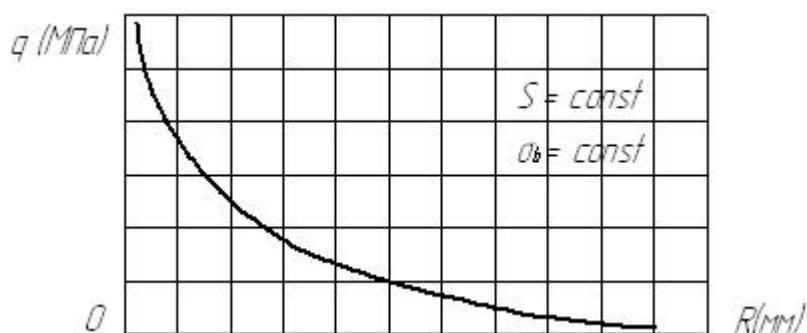


Рис.4. Зависимость давления эластичной среды от диаметра формблока

Анализируя график изменения давления от радиуса, можно заключить, что минимальный радиус отверстия зависит от возможностей обеспечить высокое давление эластичной среды.

### ОПЕРАЦИЯ ВЫРУБКИ

Технологическая схема операции гибки представлена на рис. 5. Основными технологическими параметрами рассматриваемого процесса являются: давление эластичной среды, усилие среды, минимальный радиусгиба, величина пружинения детали, величина заготовки.

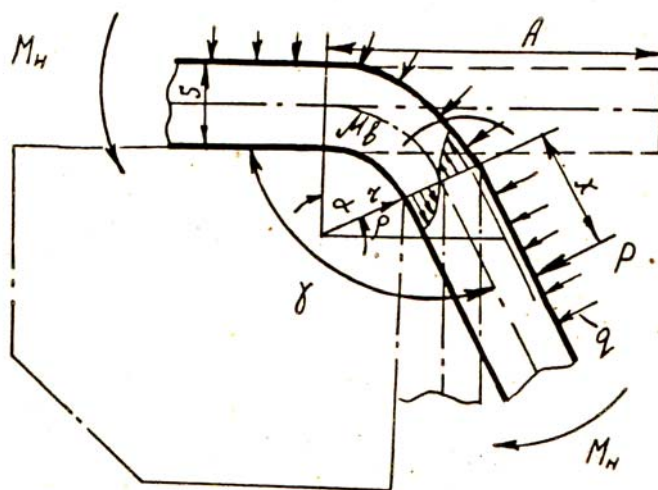


Рис. 5. Схема действия сил при гибке

Определение силовых параметров процесса проводится из условия равенства моментов от внешних сил моменту от внутренних сил заготовки, т.е. моменту сопротивления заготовки:

$$M_{\text{внеш}} = M_{\text{внутр}} \quad (9)$$

Принимая гипотезу плоских сечений, момент сопротивления заготовки можно установить:

$$M_{\text{внутр}} = \frac{K'_Q S^2}{2^{n+1} (n+2) \left( \frac{\sqrt{R \cdot r}}{S} \right)^2}, \quad (10)$$

где  $K'_Q$  – приведенный коэффициент аппроксимации:

$$K'_Q = \frac{K_Q}{(1 - \mu_{12} \mu_{21})^{0.5(1+n)}}, \quad (10')$$

где  $K_Q, n$  – коэффициент степеней аппроксимации;

$\mu_{12} \mu_{21}$  – коэффициенты анизотропии вдоль оси и поперек оси прокатки листа;

$R, r$  – наружный и внутренний радиусы гiba.

Момент внешних сил в соответствии со схемой (см. рис. 5) находится относительно сечения 1-1, в котором заготовка испытывает внутреннее сопротивление:

$$M_{\text{внеш}} = Px = gxb = g(A - ra)^2 b, \quad (11)$$

где  $x$  – плечо действия результирующей силы, приложенной к свободному участку заготовки;

$r$  – радиус гiba;

$\alpha$  – угол гiba;

$A$  – длина свободного участка гiba в исходном состоянии;

$b$  – ширина заготовки.

С учетом соотношений (9)–(10) найдем давление, необходимое для гiba:

$$g = \frac{M_{\text{внутр}}}{(A - r \cdot \alpha) b}. \quad (12)$$

Минимальный радиус гiba, при котором заготовка изгибается не разрушаясь, можно установить на основе критерия разрушения Колмогорова:

$$r_{\text{min}} = S \frac{1 - 0,5(1 - \psi_{\text{и}})^t}{(1 - \psi_{\text{и}})^{t-1}}, \quad (13)$$

где  $t = -2\sqrt{1 - \mu^2} \exp \left[ \frac{-0,72(1 + \mu)}{\sqrt{1 - \mu^2}} \right],$

$\psi_{ин}$  – относительное сужение в момент образования шейки образца при линейном растяжении.

При гибке листовых металлов после снятия внешней нагрузки имеет место значительное перемещение, связанное с упругой разгрузкой металла. Это объясняется наличием разноименных по знаку тангенциальных напряжений по толщине заготовки. Имеющий место упругий момент разгрузки связан со стремлением растянутых волокон сжаться, а сжатым растянуться. Количественной характеристикой упругой разгрузки является угол пружинения при гибке равный разности между углами инструментальной оснастки и детали:

$$\Delta\alpha = -\alpha_{\partial} + \alpha_{ин}. \quad (14)$$

Для определения угла пружинения пользуются условием постоянства длин образующих детали под действием внешних сил и после снятия нагрузки:

$$\alpha_{\partial}\rho_{\partial} = \alpha_{ин}\rho_{ин}$$

или

$$\alpha_{\partial} = \alpha_{ин} \frac{\rho_{ин}}{\rho_{\partial}}. \quad (15)$$

В последнем соотношении радиус детали или остаточный радиус находят из уравнения, полученного на основе теоремы А.А. Ильюшина о разгрузке:

$$\rho_{\partial} = \frac{\rho_{ин}}{1 - \frac{3}{2+n} \frac{K'_{\partial}}{E} \left( \frac{2\rho_{ин}}{S} \right)^{1-n}}, \quad (16)$$

где  $E$  – модуль упругости.

Соотношения (14)–(16) приводятся к виду

$$\Delta\alpha = \alpha_{ин} \frac{3}{2+n} \frac{K'_{\partial}}{E} \left( \frac{2\rho_{ин}}{S} \right)^{1-n}. \quad (17)$$

Зависимость (17) является функцией как механических свойств материала, так и геометрических параметров (рис. 6). Обращает внимание и тот факт, что на величину пружинения оказывает влияние анизотропия свойств. Поэтому необходимо учитывать линиюгиба листа относительно направления прокатки. Если линиягиба совпадает с направлением прокатки, то в выражении (10') следует принять:  $\mu_{12}\mu_{21} = \mu_{21}^2$ , если линиягиба перпендикулярна направлению прокатки, то  $\mu_{12}\mu_{21} = \mu_{12}^2$ .

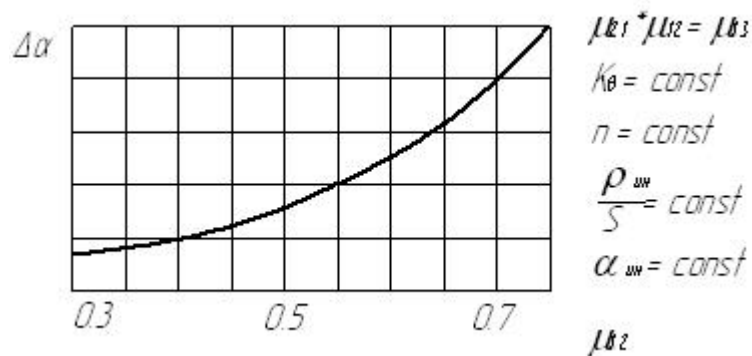


Рис. 6. Зависимость угла пружинения от коэффициента анизотропии при линии гибки поперек направления прокатки

### **Оборудование, оснастка, материал, инструмент**

Работа выполняется на гидравлическом прессе ПСУ-250. Пресс развивает усилие до 2500 кН. Холостой ход пресса осуществляется передвижением верхней плиты, включением электродвигателя, рабочий ход – передвижением нижней плиты, которая приводится в действие гидроцилиндром. Ход нижней плиты небольшой, 80 мм, поэтому все установочные операции следует проводить перемещением верхней плиты. Усилие пресса снимается по силоизмерителю, имеющему относительную шкалу измерения. Абсолютные значения усилия снимаются по тарифовочному графику. Схема штамповой оснастки представлена на рис. 7.

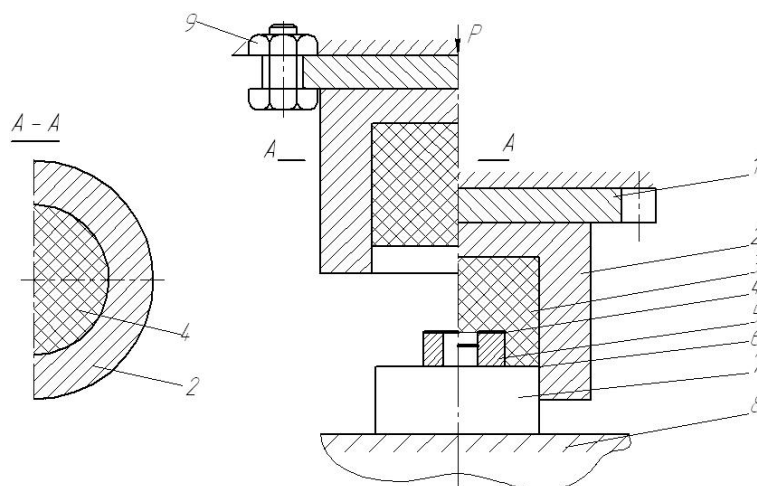


Рис. 7. Схема штамповой оснастки: 1 – верхняя подштамповая плита; 2 – контейнер; 3 – эластичная среда; 4 – заготовка; 5 – формоблок; 6- подкладная плита; 7 – подставка, 8 – подштамповая плита

Она состоит из контейнера 2, эластичной среды 4, формоблока 5, подкладочной плиты 6, подставки 7, подштамповой плиты 8. Контейнер ( $\varnothing = 100\text{мм}$ ) закреплен к верхней плите пресса болтами 9. Подставка 8

центрируется собственным весом. При опускании контейнера 2 подставка 7 входит в контейнер и образует замкнутое пространство, в котором находится формоблок 6 с предварительно установленной на нем заготовкой 4. Смыкание подвижной и неподвижной частей штампа приводит к росту давления эластичной среды, в качестве которой используется полиуретан. Эластичная среда создает равномерное давление по всему объему, образуя внешние силы, действующие на заготовку в операциях вырубке, пробивки, гибки (см. рис. 1, 3, 5). Контейнер должен обладать достаточной прочностью в целях безопасности и изготавливаться из вязкого и прочного материала. Он должен выдержать с запасом давление  $q = P/F$  (где  $P$  – усилие прессы,  $F$  – площадь сечения контейнера).

Конструкция формоблоков позволяет проводить операции вырубке, пробивки и гибки (рис. 8). Для операции вырубке используются формоблоки в виде цилиндра различной высоты (5, 10, 15 мм), для операции пробивки используются кольца одной высоты, но разного диаметра (25, 30, 50 мм). Кромки этих формоблоков должны иметь радиус закругления близкий к нулю, т.е. быть достаточно острыми. Для операции гибки используют 2 формоблока. Один из них имеет углы гiba  $90^\circ$  с радиусами закругления 1, 3, 5, 8мм, другой формоблок имеет для всех четырех углов постоянный радиус инструмента 4мм, но различные углы:  $85^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $95^\circ$ .

Диаметры по наружному контуру формоблоков для вырубке, пробивки равны 60мм, размеры формоблоков для гибки, имеющих форму параллелограмма, 40x40x80 мм.

Материалом заготовки могут быть различные сплавы, толщиной 0,5 -1мм. Размеры заготовок должны обеспечить нормальное протекание процессов. Для операции вырубке размер заготовки должен обеспечить защемление края. Поэтому его диаметр должен быть в пределах 80 – 90 мм. Для операции пробивки наружный диаметр заготовки целесообразно брать равным наружному диаметру формоблока 60 мм. Размеры в плане заготовок для гибки 60 x 80мм.

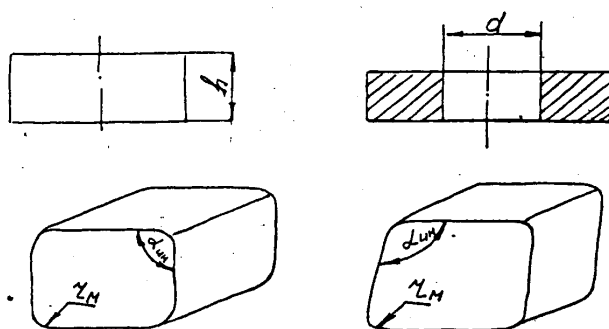


Рис. 8. Формоблоки для операций вырубке, пробивки, гибки

Механические характеристики материала (показатель упрочнения –  $n$ , коэффициент степенной аппроксимации –  $K_Q$ , коэффициенты анизотропии  $\mu_{12}\mu_{21}$ ) находятся в справочной литературе или выдаются преподавателем. В качестве инструмента используются штангенциркуль с ценой деления 0,05мм и угломер с ценой деления 5 минут.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Перед началом работы необходимо ознакомиться с устройством и работой гидропресса ПСУ-250.

2. С помощью холостого хода проверяют соосность верхней и нижней половины штампа.

3. На подкладочную плиту последовательно устанавливаются формоблоки для вырубки, пробивки, гибки.

4. Устанавливаются механические характеристики металла: показатели упрочнения  $K_Q, n$ , коэффициенты анизотропии.

5. Заготовку и формоблок компонуют соответствующим для выбранной операции образом.

6. Проводят для трех заготовок с различными диаметрами формоблока (25, 30, 50мм) операцию пробивки, для других трех заготовок с различными высотами формоблока ( 5, 10, 15мм) – операцию вырубки, для четырех заготовок – операцию гибки.

7. Для операции вырубки, пробивки снимаются усилия деформирования на стадии разрушения с характерным специфичным звуком.

Для операций гибки процесс проводят до момента достижения одного усилия (например, 200 кН).

8. Производят замер восьми углов детали после гибки с помощью угломера. Рассчитывают угол пружинения как разность между углами детали и инструмента.

9. Рассчитывают давление для всех операций штамповки из формулы (6).

10. Используя формулы (5), (8), (17), строят графические зависимости в координатах  $q = f(h)$  – для вырубки,  $q = f(d)$  – пробивки  $\Delta\alpha = f(r_n)$ ,  $\Delta\alpha = f(\alpha_{ин})$  – гибки. Остальные параметры считаются постоянными.

11. Полученные экспериментальные значения откладывают на рисунках, в которых представлены зависимости в координатах  $q = f(h)$  – для вырубки,  $q = f(d)$  – пробивки,  $\Delta\alpha = f(r_n)$ ,  $\Delta\alpha = f(\alpha_{ин})$  – гибки.

12. Оформляют отчет, в котором должны содержаться: перечень оборудования, оснастки, инструмента, схема штамповой оснастки и тех-



нологические схемы операции, расчетные формулы, таблицы замеров (табл. 1, 2).

**Таблица 1. Результаты замеров усилия в операциях вырубки, пробивки**

$d$ , мм			$h$ , мм		
25	30	50	5	10	15

**Таблица 2. Результаты замеров угла детали**

$\alpha_{ин}$ $r_m$ , мм	$75^0$	$85^0$	$90^0$	$95^0$	$105^0$
1					
3					
5					
8					

При замерах физических величин считается, что точность приборов намного превышает требуемую точность замеров. Это позволяет проводить одноразовые измерения.

### ***Вопросы для закрепления материала***

1. Почему с увеличением диаметра формблока при вырубке и высоты формблока при пробивке давление эластичной среды падает?
2. Чему будет равняться давление эластичной среды, если операцию вырубки производить одновременно на двух формблоках с диаметром отверстия 25мм, 30мм?
3. Чем объяснить разную величину пружинения при гибке широких полос, имеющих линиюгиба вдоль и поперек направления проката?
4. Как влияет величина пластичной деформации на пружинение в процессах обработки металлов давлением вообще и при гибке в частности?
5. Почему в рассмотренных операциях резки с применением эластичной среды невысокое качество реза?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценка погрешностей в учебном лабораторном практикуме [Текст]: учеб. пособие / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская. – Томский гос. политехнический ун-т.- Томск: Изд-во Томского гос. политехн. ун-та, 2011. – 86 с.
2. Григорьев, Л.Л. Холодная штамповка [Текст]: справочник / Л.Л. Григорьев, К.М. Иванов, Э.Е. Юргенсон. – СПб.: Политехника, 2009. – 665 с.
- 3.Яковлев, С.С. Ковка и штамповка [Текст]: справочник. В 4 т. Т.4 Листовая штамповка / под общ. ред.С.С. Яковлева, ред.совет: Е.И. Семенов (пред.) [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2010. – 732 с.
- 4.Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А.Попов. – М.: Машиностроение, 1977.
- 5.Головлев, В.Д. Расчеты процессов листовой штамповки [Текст] / В.Д. Головлев. – М.: Машиностроение, 1974.
- 6.Демьяненко, Е.Г. Проектирование технологических процессов формообразования тонкостенных осесимметричных деталей летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие / Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов. – Самара: СГАУ, 2014. – 144 с.
- 7.Кухарь, В.Д. Влияние технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала [Текст] / В.Д. Кухарь, С.С. Яковлев, К.С. Ремнев // Кузнечно-штамповочное производство. – 2011. – № 12. – С. 3-10.
- 8.Предельное формоизменение при штамповке деталей летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие / В.В. Уваров, Ю.М. Арышенский, В.И. Мордасов [и др.]. – Куйбышев: КуАИ, 1978.
- 9.Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов [Текст] / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
- 10.А.с. 1266607 СССР. Устройство для глубокой вытяжки [Текст] / И.П. Попов, В.Д. Маслов, В.П. Чистяков [и др.]. Оpubл. в Бюл. № 40, 1986.
- 11.Чистяков, В.П. Штамповка полусфер без утонения стенок [Текст] / В.П. Чистяков, А.Г. Овчинников, И.П. Попов //Машина и технология обработки металлов давлением: тр. МВТУ. Вып. 229, 1976.
- 12.А.с. 550200 СССР. Способ изготовления штампованных днищ с отбортованными наружу люками [Текст] / В.П. Чистяков, И.П. Попов, Л.С.Токмак. – Оpubл. в Бюл. № 10, 1977.

13.А.с. 633643 СССР. Способ штамповки полых осесимметричных изделий [Текст] / В.П. Чистяков, А.Г. Овчинников, И.П. Попов [и др.]. – Оpubл. в Бюл. № 43, 1978.

14.А.с. 1050778 СССР. Способ штамповки цилиндрических деталей с коническим участком со стороны открытого торца [Текст] / И.И. Попов, А.Г. Овчинников, В.П. Чистяков [и др.]. – Оpubл. в Бюл. № 40, 1983.

Учебное издание

*Гречников Фёдор Васильевич  
Демьяненко Елена Геннадьевна  
Попов Игорь Петрович*

**ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ  
ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

Учебное пособие

Редактор Т.К. Кретинина  
Доверстка Л.Р. Дмитриенко

Подписано в печать 19.08.2015. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 4,75.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. Д1(1)/2015.

федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева  
(национальный исследовательский университет)»  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во СГАУ, 443086 Самара, Московское шоссе, 34.