

Документ подписан простой электронной подписью

Информация: Министерство науки и высшего образования РФ

ФИО: Игнатенко Виталий Иванович

Должность: Проректор по образовательной деятельности и молодежной политике  
ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского»

Дата подписания: 06.03.2023 09:47:13

Уникальный идентификатор документа

Кафедра технологических машин и оборудования  
a49ae343af5448d45d7e3e1e499659da8109ba78

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

*Методические указания  
к лабораторным работам*

Норильск 2023

Обработка металлов давлением: метод. указ. к лаб. работам / сост.: С.С. Пилипенко, Ю.Г. Серебренников, А.Я. Сарафанова; Министерство науки и высшего образования РФ, Заполярный гос. ун-т им. Н.М. Федоровского. – Норильск: ЗГУ, 2023. – 68 с. – Библиогр.: с. 65–66. – Текст: непосредственный.

Методические указания соответствуют теоретическим разделам курсов дисциплин «Основы производства и обработки металлов» и «Технология конструкционных материалов». Способствуют более глубокому пониманию влияния различных факторов на энергосиловые и геометрические параметры процессов обработки металлов давлением. Развивают инженерное мышление и способность к проведению научных исследований.

Предназначены обучающимся бакалавриата направлений подготовки «Технологические машины и оборудование», «Металлургия», «Наземные транспортно-технологические комплексы» всех форм обучения.

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержат девять лабораторных работ, в которых изложена физическая сущность наиболее распространенных операций обработки металлов давлением. Излагаются технологические возможности рассматриваемых операций, приводятся теоретические зависимости для расчета основных технологических параметров, а также схемы операций обработки металлов давлением, задачи лабораторно-практических работ и порядок их выполнения.

Позволяют повысить эффективность усвоения учебного материала за счет выработки практических навыков при выполнении самостоятельной работы с использованием имеющегося в лаборатории прессового оборудования, измерительного инструмента и лабораторных штампов. Также облегчают работу преподавателей и студентов благодаря наличию в них алгоритма выполнения практической части лабораторных работ, необходимых схем и рисунков. Может быть полезно учащимся учебных заведений системы профессионального технического образования, выполняющих учебно-технологический практикум по обработке металлов давлением.

### **Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ**

1. Перед началом работы необходимо убедиться, что все проходы к оборудованию, на котором выполняются работы, свободны. Если площадка или проходы возле оборудования заняты посторонними предметами (портфелями, сумками, стульями и т.д.), затрудняющими перемещение, их следует убрать до начала работы.

2. Не следует слишком близко подходить к работающему оборудованию и опираться на него. Запрещается во время работы отвлекаться и заниматься другими делами, не имеющими отношения к выполняемой работе.

3. Запрещается находиться около вращающихся деталей (муфт, прокатных валков и др.) в расстегнутой

одежде, с висячими концами шалей, шарфов, галстуков и др., а также с распущенными волосами.

4. Перед включением кнопки «Пуск» необходимо убедиться в том, что все вращающиеся детали оборудования закрыты ограждениями, и включение агрегата не представляет опасности для окружающих, которых необходимо предупредить о предстоящем включении.

5. Включать и выключать агрегаты должен только тот студент, которому преподаватель поручил эту работу. Во время перерывов оборудование должно быть остановлено, после окончания работы – остановлено и обесточено.

6. После окончания работ измерительный инструмент следует сдать руководителю, а использованные образцы собрать в местах, указанных руководителем.

7. В лаборатории широко проводятся научные исследования, часто с использованием того же оборудования, что и при проведении лабораторных работ, поэтому запрещается без специального разрешения трогать измерительную аппаратуру и образцы, не относящиеся к проводимой работе, чтобы не нарушать настройку аппаратуры, порядок расположения образцов и не нанести ущерб исследовательской работе.

8. При выполнении работ следует строго выполнять все требования руководителя.

# Лабораторная работа №1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ВЫТЯЖКИ

### Основные сведения о вытяжке

**Операцией вытяжки** называется технологический процесс получения полой пространственной детали (цилиндрической или коробчатой) из плоской листовой заготовки.

Плоская заготовка 3 укладывается на матрицу 4, имеющую отверстие со скругленными кромками и прижимается к ней прижимом 2 (рис. 1.1, а). Цилиндрический пуансон 1 со скругленными кромками при своем движении вниз воздействует на центральную часть заготовки и заталкивает её в отверстие матрицы. При этом наружная часть заготовки втягивается в матрицу с образованием вертикальной цилиндрической стенки (рис. 1.1, б). После того как вся заготовка будет втянута в матрицу (рис. 1.1, в), процесс заканчивается, и полученная деталь снимается с пуансона. В результате операции из плоской заготовки получается цилиндрический стакан с доньшком.

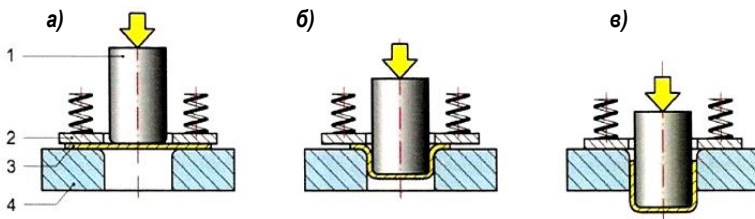


Рис. 1.1. Схема последовательного выполнения операции вытяжки

Существуют определенные условия, необходимые для нормального выполнения операции вытяжки. Несоблюдение этих условий может привести к браку получаемой детали (отрыв доньшка, складки на поверхности и др.). Поэтому для того чтобы изготовить цилиндрический стакан заданных размеров, необходимо предварительно рассчитать размеры заготовки и определить напряжения и деформации, возникающие в опасных сечениях заготовки в процессе деформирования.

На рис. 1.2, а показаны обозначения размеров, принятые в расчетных формулах, а на рис. 1.2, б – часть заготовки на промежуточной стадии вытяжки с указанием напряжений, действующих в различных точках заготовки.

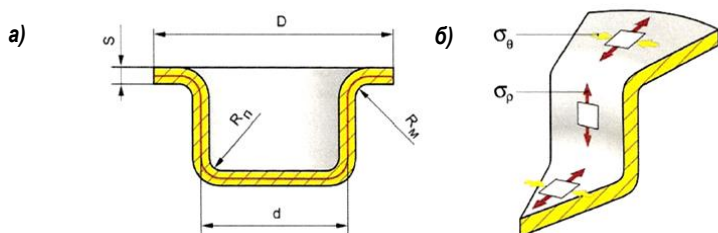


Рис. 1.2. Обозначение размеров заготовок и напряжения, действующих в них

Перемещение средней части заготовки при вытяжке вызывает появление в ее наружной части (фланце) растягивающих радиальных  $\sigma_p$  и сжимающих тангенциальных  $\sigma_\theta$  напряжений. Под действием сжимающих напряжений  $\sigma_\theta$  на фланце могут образовываться складки, которые способны перейти и на цилиндрическую вертикальную стенку стакана, что является признаком брака. Чем больше толщина заготовки и меньше ширина кольцевого фланца, тем меньше вероятность потери устойчивости фланца и образования складок.

Для того чтобы избежать появления складок при вытяжке применяют прижим заготовки. Необходимость использования режима можно определить по упрощенной эмпирической формуле

$$D - d \leq 18 S. \quad (1.1)$$

Если это соотношение выдерживается, то в процессе вытяжки фланец не теряет устойчивости, складки не образуются и вытяжку можно производить без прижима.

Наиболее опасным сечением является зона перехода от вертикальной стенки стакана к доньшку, где растягивающие напряжения  $\sigma_p$  достигают наибольших значений. В этом месте может произойти отрыв доньшка от стенки.

Для нормального протекания процесса вытяжки необходимо, чтобы максимальное растягивающее напря-

жение  $\sigma_{pmax}$ , действующее в опасном сечении, не превышало предела текучести материала:

$$\sigma_p < \sigma_m.$$

Значение силы вытяжки определяется формулой

$$P = \sigma_{pmax} \pi d S, \quad (1.2)$$

где  $d$  – средний диаметр вытягиваемого стакана;  $S$  – толщина заготовки.

Для теоретического расчета силы вместо  $\sigma_{pmax}$  следует подставлять  $\sigma_m$  – предел текучести материала заготовки.

В процессе вытяжки толщина заготовки увеличивается от исходной  $S$  до  $S_{max}$  у края вытянутого стакана:

$$S_{max} = S \sqrt{\frac{D}{d}}. \quad (1.3)$$

Одним из основных факторов, определяющих возможность выполнения операции вытяжки, является коэффициент вытяжки:

$$K_e = \frac{D}{d}. \quad (1.4)$$

Установлено, что предельным значением коэффициента вытяжки для разных материалов является значение  $K_{emax} = 1,8-2,0$ .

Таким образом, зная диаметр стакана  $d$ , который необходимо вытянуть, можно рассчитать необходимый диаметр заготовки:

$$D = d K_e. \quad (1.5)$$

Исходя из равенства площади поверхности заготовки и площади поверхности детали (рассчитанной по среднему диаметру  $d$ ) можно определить высоту стакана  $H$ .

При вытяжке без фланца высота стакана (без учета радиуса скругления) определяется по формуле

$$H = \frac{A_s - A_d}{\pi \cdot d}, \quad (1.6)$$

где  $A_s = \frac{\pi D^2}{4}$  – площадь заготовки;  $A_d = \frac{\pi d^2}{4}$  – площадь донышка стакана.

Отсюда следует, что высоту получаемого при вытяжке стакана без фланца можно определить по формуле:

$$H = \frac{D^2 - d^2}{4d}. \quad (1.7)$$

Обычно при вытяжке высота стакана получается меньше его диаметра. Для того чтобы получить значительную высоту стакана, вытяжку производят в несколько приемов, т.е. за несколько переходов. При этом должно быть соблюдено правило: на каждом переходе коэффициент вытяжки не должен превышать предельное значение  $K_{\text{сmax}}$ .

Для этого общий коэффициент вытяжки  $K_{\text{с}}$  разбивают на несколько, так, чтобы соблюдалось равенство:

$$K_{\text{с}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (1.8)$$

где каждый из коэффициентов  $K_i$  не превышает допустимого значения.

Например, необходимо изготовить стакан с размерами  $H_3$  и  $d_3$ . Из равенства площадей поверхностей детали и заготовки определяется диаметр исходной заготовки  $D$ . Если при этом значение коэффициента вытяжки  $K = D/d_3$  превысит предельное значение  $K_{\text{сmax}}$ , то определяют количество необходимых переходов вытяжки, на каждом из которых назначают допустимый коэффициент вытяжки:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = \frac{D}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{d_2}{d_3} = \frac{D}{d_3}. \quad (1.9)$$

Деталь изготавливают за несколько переходов, перекладывая заготовку из первой матрицы во вторую, затем в третью и т.д. (рис. 1.3).

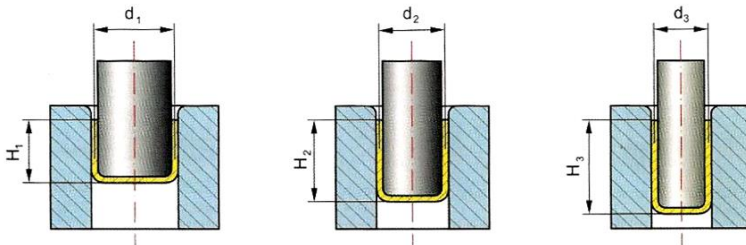


Рис. 1.3. Получение стакана значительной высоты за несколько переходов



## Содержание работы

В ходе лабораторной работы необходимо определить:

1. *Предельный коэффициент вытяжки  $K_{\text{max}}$ .* Для этого стакан заданного диаметра  $d$  вытягивают из разных заготовок, постепенно увеличивая их диаметр  $D$ . Тем самым изменяется коэффициент вытяжки  $K = D/d$ . Коэффициент вытяжки, при котором произойдет отрыв доньшка стаканчика, соответствует предельному коэффициенту вытяжки  $K_{\text{max}}$  для данного материала. Опыт может быть повторен для заготовок из другого материала.

2. *Усилие и работу деформирования при вытяжке.* Усилие деформирования при вытяжке определяется по показаниям датчика усилия и записывается на компьютер в функции времени. Одновременно датчиком перемещения записываются данные о перемещении пуансона в функции времени. Исключая из этих двух графиков параметр времени, получают график силы в функции перемещения. Площадь этого графика (интегрирование) определяет работу деформирования.

3. *Максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_r$ , действующие в опасном сечении.* Они находятся из формулы усилия вытяжки при подстановке в нее экспериментального значения силы деформирования.

4. *Необходимость применения прижима фланца.* Определяется визуально по наличию или отсутствию складок на стаканчике. Толщину краевой части вытянутого стакана сравнивают с расчетным значением.

### Оборудование, инструмент, образцы

**Оборудование:** пресс, номинальной силой 100 Кн.

**Инструмент:** специальный штамп для вытяжки с матрицей и пуансоном для изготовления стаканчика наружным диаметром 30 мм (рис. 1.4).

**Образцы:** круглые заготовки диаметром 40, 45 и 50 мм, толщиной 2 мм из листовой малоуглеродистой стали, мягкой отожженной меди или мягких алюминиевых сплавов.

**Измерительный инструмент:** штангенциркуль, микрометр, линза с 5-кратным увеличением.

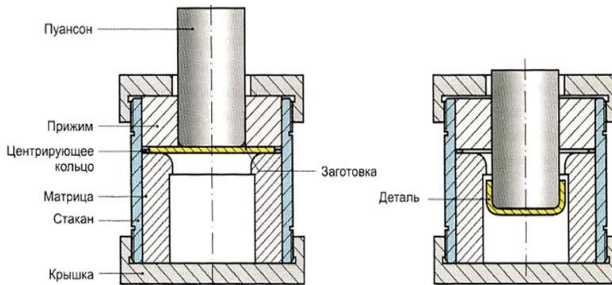


Рис. 1.4. Штамп для вытяжки

### Порядок выполнения работы

*Выполнить теоретические расчеты:*

1. Для заданного диаметра  $d$  вытягиваемого стакана определить диаметр  $D$  заготовок, принимая коэффициент вытяжки  $K_v$  в пределах 1,6–1,9.

2. Проверить необходимость применения прижима.

3. Определить ожидаемую максимальную толщину стенки  $S_{\max}$  краевой части вытягиваемого стакана.

4. Определить максимальную силу вытяжки  $P_{\max}$  – принимая максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_{r\max}$  равными пределу текучести  $\sigma_m$  материала.

*Выполнить экспериментальные работы:*

1. Разобрать штамп для вытяжки, сняв пуансон, фланец и прижим.

2. Установить в матрицу центрирующее кольцо и заготовку меньшего диаметра  $D$ , предварительно смазав плоскость и кромку отверстия матрицы машинным маслом.

3. Собрать штамп, обеспечив касание прижима и заготовки с минимальным усилием.

4. Установить штамп в рабочую зону прессы и произвести вытяжку стакана с записью силы деформирования и перемещения пуансона.

5. Разобрать штамп, извлечь вытянутый стакан.

6. Измерить диаметр  $d$  стакана и толщину  $S_{\max}$  его краевой части.

7. Повторить опыты по пп. 2–4, увеличивая диаметр  $D$  заготовок до появления трещин в детали. Определить предельный коэффициент вытяжки, соответствующий разрушению детали.

8. Повторить опыты по пп. 2–5 для заготовок из другого материала (с другим пределом текучести).

*Произвести обработку полученных данных:*

1. Используя запись силы и перемещения во времени, построить зависимость силы деформирования по ходу вытяжки  $P = (S)$ , сделать вывод о характере этой зависимости, определить работу деформирования.

2. Используя экспериментальное значение силы деформирования  $P$ , рассчитать фактические максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_{pmax}$ , действующие в заготовке и сравнить с принятыми. Сравнить теоретические и фактические силы вытяжки.

3. Сравнить теоретические и фактические значения толщины краевой части вытянутого стакана. Оценить величину утолщения стенки стакана по сравнению с толщиной исходной заготовки.

4. Сравнить предельные коэффициенты вытяжки для разных материалов, сделать выводы о влиянии этого коэффициента на усилие вытяжки.

5. Построить графики  $P = (K_e)$ ,  $\sigma_{pmax} = (K_e)$  и  $S_{max} / S = (K_e)$ . Исходные, расчетные и экспериментальные данные занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Материалы	$d$ , мм	$D$ , мм	$K_e$	$S$ , мм	$S_{max}$ , мм		$\frac{S_{max} \rho}{S_{max}}$	$P_{max}$ , кН		$\frac{P_{max} \rho}{P_{max}}$	$\sigma_m$ , кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_p$ , кН/см <sup>2</sup>
					расчет	эксперимент		расчет	эксперимент			
Сталь												
Медь												
Алюминий												

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Возможность изготовления вытянутого стакана определяется предельным коэффициентом вытяжки.

2. В процессе вытяжки происходит утолщение стенки у краевой части стакана за счет действия сжимающих напряжений во фланце. В связи с этим зазор между пуансоном и матрицей необходимо рассчитывать по этой утолщенной стенке, чтобы не происходил зажим стенки стакана при вытяжке.

3. В процессе вытяжки происходит уменьшение толщины стенки стакана в области перехода к его доньшку в связи с тем, что здесь действуют максимальные растягивающие напряжения. Разрушение происходит в этой зоне.

4. В процессе вытяжки возможна потеря устойчивости фланца с образованием складок. Вероятность складкообразования тем больше, чем тоньше материал и больше ширина фланца.

Для устранения складкообразования применяют прижим заготовки, сила прижима определяется расчетом.

5. Усилие вытяжки тем больше, чем больше коэффициент вытяжки, толще материал, выше предел текучести материала и меньше радиус скругления матрицы.

6. Наибольшее усилие возникает в начальной стадии вытяжки.

## ***Лабораторная работа №2***

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ВЫРУБКИ**

#### **Основные сведения о вырубке**

**Вырубка** – технологическая разделительная операция, при которой из деформируемой части листовой заготовки при сдвиге материала по заданному контуру отделяется (вырубается) деталь с заданным внешним контуром.

Контур детали определяется контуром вырубного инструмента-пуансона и матрицы (рис. 2.1).

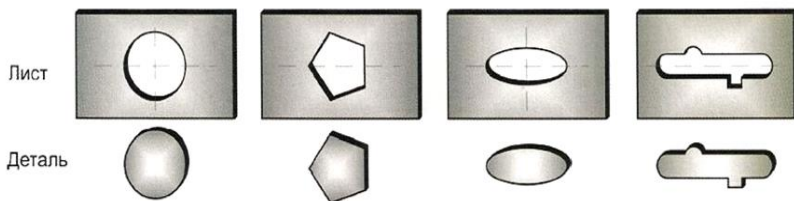


Рис. 2.1. Заготовки и детали, полученные вырубкой

Пуансон должен входить в матрицу с зазором  $Z$ , величина которого существенно влияет на качество боковой поверхности вырубаемой детали. Процесс вырубki начинается с момента, когда пуансон 1 соприкасается с поверхностью заготовки 2, установленной на матрице 3 (рис. 2.2, а).

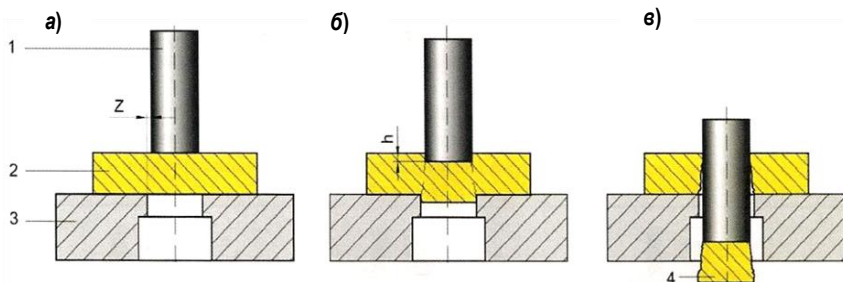


Рис. 2.2. Стадии выполнения операции вырубki

При внедрении пуансона в тело заготовки в ней возникают напряжения, распределение которых по деформируемому объему неравномерно. Наибольшие напряжения возникают вблизи острых кромок матрицы и пуансона, играющих роль концентраторов напряжений.

В начале внедрения напряжения не превышают предела прочности материала и процесс идет в зоне пластических деформаций, в результате чего образуется скругленная форма перехода от свободной поверхности заготовки к кромке пуансона и от свободной поверхности детали к кромке матрицы. По мере движения пуансона напряжения увеличиваются, достигают предельного значения, соответствующего разрушению материала, и происходит срез волокон материала на участке внедрения высотой  $h$ .

В конце этого участка вблизи кромок пуансона и матрицы в материале образуются трещины (см. рис. 2.2, б).

После появления трещин процесс разрушения материала становится саморазвивающимся – трещины развиваются вглубь материала, встречаются, происходит отделение детали от заготовки. Последняя стадия процесса – проталкивание детали 4 через заготовку и матрицу (рис. 2.2, в).

На рис. 2.3 показаны характерные участки боковой поверхности детали и заготовки после вырубki.

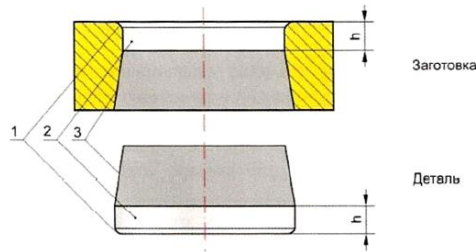


Рис. 2.3. Характерные участки боковой поверхности детали и заготовки после вырубki

*Участок 1* – скругление поверхности, образовавшееся на начальной стадии вырубki, когда напряжения в материале еще не достигли предельного значения и материал деформируется пластически, без разрушения.

*Участок 2* – блестящий поясok. На этом участке напряжения превышают предел прочности материала, и в результате перерезания волокон материала при внедрении пуансона в заготовку на глубину  $h$  образуется блестящий поясok.

*Участок 3* – поверхность скалывания. Эта зона образуется в результате развития трещин со скоростью, превышающей скорость движения пуансона, в результате чего происходит резкий срыв нагрузки. Зазор  $Z$  между пуансоном и матрицей существенно влияет на точность размеров вырубаемой детали, качество ее боковой поверхности и стойкость инструмента.

На рис. 2.4 показано развитие трещин скалывания при различных зазорах  $Z$ .

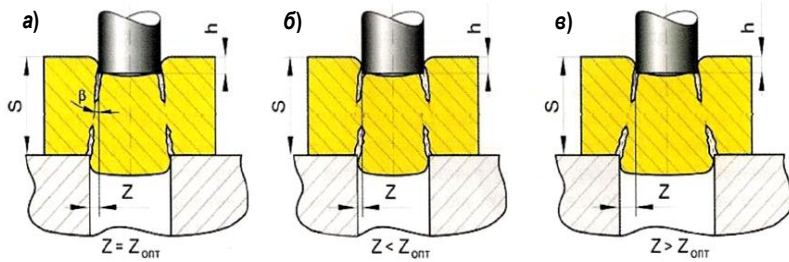


Рис. 2.4. Развитие трещин скалывания при вырубке

Оптимальным считается минимальный зазор, обеспечивающий совпадение трещин скалывания (рис. 2.4, а).

Его величина приблизительно может быть определена по формуле

$$Z = (S - h) \cdot \tan\beta, \quad (2.1)$$

где  $\beta$  – угол наклона трещины к оси инструмента;  $h$  – глубина внедрения режущей кромки пуансона до появления трещин;  $S$  – толщина заготовки.

Среднее значение угла  $\beta$  находится в пределах  $40\text{--}60^\circ$ , меньшие значения принимаются для более твердых материалов. Глубина внедрения  $h$  колеблется в пределах:

$$h = (0,1 - 0,5) S, \quad (2.2)$$

где меньшие значения принимаются для более прочных и твердых материалов и возрастают для более пластичных.

Из сказанного следует, что минимальная величина зазора, обеспечивающая совпадение трещин скалывания, уменьшается с повышением пластичности металла, т.е. для мягких металлов (медь, алюминий и др.) необходимо устанавливать меньшие зазоры, чем для твердых (сталь).

Уменьшение зазора по сравнению с оптимальным приводит к тому, что трещины скалывания не встречаются, и боковая поверхность получается рваной, с дополнительными поясками разрушения (см. рис. 2.4, б).

При зазоре  $Z$ , большем оптимального, трещины встречаются, однако при этом боковая поверхность скалывания не является единой, а состоит из двух пересекающихся поверхностей скола (см. рис. 2.4, в).

Максимальная сила вырубки определяется по формулам:

$$P_{\max} = 0,5 \cdot L \cdot S \cdot \sigma_{\sigma} \quad (2.3)$$

или

$$P_{\max} = k \cdot L \cdot S \cdot \sigma_{cp}, \quad (2.4)$$

где  $L$  – периметр вырубаемой детали;  $S$  – толщина заготовки;  $k = (1,1-1,3)$  – коэффициент, учитывающий возможность притупления режущих кромок;  $\sigma_{\sigma}$  – предел прочности материала;  $\sigma_{cp}$  – сопротивление срезу.

Характеристики материала  $\sigma_{\sigma}$  и  $\sigma_{cp}$  содержатся в справочной литературе [4].

Влияние величины зазора  $Z$  при вырубке проявляется в следующем: при зазоре, большем оптимального, возрастает изгиб и искажение заготовки в процессе вырубки, а в детали возникают упругие деформации, уменьшающие ее размер, в результате чего диаметр детали будет несколько меньше диаметра матрицы, а диаметр вырубленного в заготовке отверстия – несколько больше диаметра пуансона. Следовательно, вырубленная деталь свободно выпадет через отверстие матрицы, а пуансон свободно выйдет из заготовки.

При зазоре, меньшем оптимального, увеличивается усилие деформирования, уменьшается изгиб и искажение заготовки в процессе вырубки, возрастает интенсивность притупления режущих кромок инструмента и износ боковых поверхностей пуансона и матрицы. После вырубки при зазорах, меньших оптимального, в детали возникают упругие деформации, увеличивающие ее размер, под действием которых диаметр детали становится больше диаметра матрицы, а диаметр вырубленного в заготовке отверстия – меньше диаметра пуансона, поэтому вырубленная деталь застревает в матрице, а заготовка плотно охватывает пуансон. Необходимо прикладывать силу для проталкивания детали через матрицу и предусматривать съемник для съема заготовки с пуансона.

Усилие съема определяется формулой

$$P_c = \mu \cdot L \cdot h \cdot \sigma_s, \quad (2.5)$$



где  $\mu$  – коэффициент трения;  $L$  – периметр детали;  $h$  – высота блестящего пояска;  $\sigma_s$  – напряжение текучести материала.

Усилие проталкивания детали принимается примерно равным усилию съема.

На рис. 2.5 показан характер изменения силы выруб-ки по перемещению пуансона при оптимальном зазоре  $Z$ .



**Рис. 2.5. Характер изменения силы выруб-ки по перемещению пуансона при оптимальном зазоре  $Z$**

Как видно из графиков, для обоих случаев сила достаточно медленно возрастает на начальной стадии деформирования, затем быстро возрастает до максимума, после чего происходит резкий срыв нагрузки до значения, соответствующего силе проталкивания. Срыв нагрузки происходит в момент образования трещин скалывания при внедрении пуансона на высоту  $h$  блестящего пояска.

При прочих равных условиях для пластичных металлов, по сравнению с твердыми металлами, максимальная сила выруб-ки меньше, скол происходит при большей глубине внедрения пуансона, следовательно, величина блестящего пояска больше (см. рис. 2.5).

### **Содержание работы**

Необходимо изучить факторы, влияющие на качество боковой поверхности выруб-аемой детали, исследовать влияние толщины заготовки и ее материала на силу выруб-ки, высоту блестящего пояска и качество поверхности среза, экспериментально определить характер изменения силы по ходу инструмента, работу деформирования.

Вырубку производят на заготовках из среднеуглеродистой стали (твердый материал) и на заготовках из отожженной меди и алюминия (мягкий материал) в штампе с оптимальным зазором между пуансоном и матрицей.

В процессе вырубки записывают силу вырубки и перемещение пуансона.

Сила деформирования определяется по показаниям датчика усилия и записывается на компьютере в функции времени. Одновременно датчиком перемещения записывается перемещение пуансона в функции времени. Исключая из этих двух графиков параметр времени, получают график силы в функции перемещения. Площадь этого графика (интегрирование) определяет работу деформирования.

В зависимости от того, застревает ли вырубленная деталь в матрице, а заготовка на пуансоне, делают вывод о том, является ли зазор между пуансоном и матрицей оптимальным или нет.

После вырубки визуально определяют качество среза, проводят измерения высоты блестящего пояска и размеров детали и отверстия.

Экспериментальные значения величин зазора и максимальной силы вырубки сравнивают с расчетными значениями.

Производят сравнения сил, высоты блестящего пояска и качества среза для образцов из разных материалов.

### **Оборудование, инструмент, образцы**

**Оборудование:** пресс, номинальной силой 100 кН.

**Инструмент:** специальный штамп с матрицей и пуансоном для вырубки кружка диаметром 14 мм (рис. 2.6).

**Образцы:** круглые заготовки диаметром 30 мм, толщиной 2 мм из листовой среднеуглеродистой стали, мягкой отожженной меди или мягких алюминиевых сплавов.

**Измерительный инструмент:** штангенциркуль, микрометр, линза с 5-кратным увеличением.

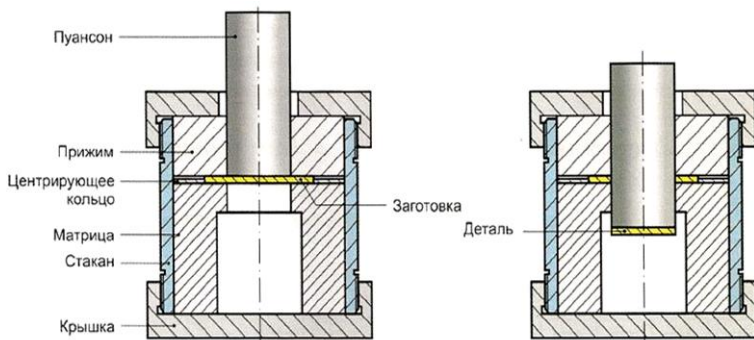


Рис. 2.6. Специальный штамп для вырубki кружка

### Порядок выполнения работы

*Выполнить теоретические расчеты:*

1. Для заданной толщины заготовки  $S$  определить высоту блестящего пояса  $h$  и оптимальный зазор  $Z$ .

2. Для заданного диаметра детали  $d$ , толщины  $S$  и материала ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_{cp}$ ) определить максимальную силу вырубki  $P_{max}$ .

3. Определить силу съема  $P_c$ , приняв коэффициент трения  $\mu = 0,1$  и напряжение текучести ( $\sigma_s = \sigma_m$ ).

*Выполнить экспериментальные работы:*

1. Разобрать штамп для вырубki, сняв пуансон, фланец и прижим.

2. Установить в матрицу центрирующее кольцо и заготовку из стали.

3. Собрать штамп, обеспечив касание прижима и заготовки с минимальным усилием. Установить штамп в рабочую зону прессы и произвести вырубку кружка с записью силы деформирования и перемещения пуансона.

4. Разобрать штамп, извлечь деталь и заготовку.

5. Измерить диаметры пуансона  $d_n$ , матрицы  $D_m$ , вырубленного кружка  $d$  и отверстия  $D$  в заготовке. Определить зазор  $Z$  между пуансоном и матрицей, сравнить с оптимальным расчетным  $Z_{opt}$ . Сравнить между собой диаметры вырубленного кружка  $d$  и пуансона  $d_n$ , диаметры отверстия в заготовке  $D$  и матрицы  $D_m$ .

Повторить опыты по пп. 2–5 для заготовок из другого материала (с другим пределом текучести).

*Произвести обработку полученных данных:*

1. Используя запись силы и перемещения во времени, построить зависимость силы деформирования по ходу вырубки  $P = P(S)$ , сделать вывод о характере этой зависимости, определить работу деформирования.

2. Используя экспериментальное значение силы деформирования  $P$ , рассчитать фактические значения предела прочности  $\sigma_0$  и напряжения среза  $\sigma_{ср}$  материала и сравнить с принятыми. Сравнить теоретические и фактические силы вырубки.

3. Сравнить теоретические и фактические значения высоты  $h$  блестящего пояска вырубленной детали.

4. Оценить влияние изменения марки материала на качество поверхности среза, величину силы вырубки, высоту блестящего пояска при данном зазоре  $Z$ .

Исходные, расчетные и экспериментальные данные занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Материалы	$d$ , мм	$D$ , мм	$S$ , мм	$Z$ , мм		$H$ , мм		$P$ , кН <sup>2</sup>		$\sigma_0$ кН/см <sup>2</sup>		$\sigma_{ср}$ кН/см <sup>2</sup>		$P_c$ , кН	
				расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
Сталь															
Медь															
Алюминий															

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Качество среза при вырубке детали зависит от величины зазора между пуансоном и матрицей.

2. Для данного материала существует оптимальный зазор, при котором срез получается наилучшим.

3. Поверхность среза имеет три характерных участка – скругление, блестящий поясик и скол.

4. Процесс отделения детали от заготовки происходит последовательно в два этапа – начальное смещение детали в заготовке при внедрении пуансона на величину  $h = (0,1-0,5)S$  и  $n$  следующее окончательное отделение детали от заготовки путем скола за счет развития трещин.

5. Сила вырубki зависит от толщины заготовки, периметра вырубаемой детали и характеристики материала (предел прочности).

6. Силовой график операции вырубki характеризуетcя резким срывом нагрузки в момент образования трещин в заготовке.

### **Лабораторная работа №3**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ГИБКИ**

### **Основные сведения об операции гибки**

**Гибка** – технологическая операция, посредством которой путем пластического деформирования заготовке придают изогнутую форму различной конфигурации (рис. 3.1). Заготовкой обычно является полоса или лист.

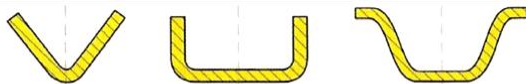


Рис. 3.1. Примеры деталей, полученных гибкой

При изгибе полосы в сечении заготовки можно выделить две зоны: зону растяжения, в которой в тангенциальном направлении действуют растягивающие напряжения  $\sigma_{\theta}$ , и зону сжатия, в которой в тангенциальном направлении действуют сжимающие напряжения  $\sigma_{\theta}$ , в радиальном направлении действуют радиальные сжимающие напряжения  $\sigma_r$ . Схема напряженного состояния заготовки при изгибе показана на рис. 3.2.

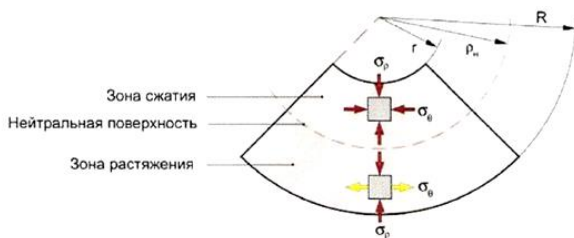


Рис. 3.2. Схема напряженного состояния заготовки при изгибе

Поверхность радиусом  $\rho_n$ , разделяющая эти две зоны, называется *нейтральной поверхностью*. На наружной поверхности радиусом  $R$  растягивающие напряжения  $\sigma_\theta$  максимальны и убывают к нейтральной поверхности.

На внутренней поверхности радиусом  $r$  сжимающие напряжения  $\sigma_\theta$  также максимальны и убывают к нейтральной поверхности. На нейтральной поверхности напряжения  $\sigma_\theta$  равны нулю. При малой толщине заготовки и значительном радиусе кривизны влиянием радиальных напряжений  $\sigma_r$  пренебрегают.

Радиус нейтральной поверхности определяется формулой

$$\rho_n = \sqrt{R \cdot r}, \quad (3.1)$$

где  $R$  и  $r$  – наружный и внутренний радиусы заготовки соответственно.

Под действием напряжений слои заготовки получают разную деформацию: в зоне растяжения слои растягиваются, в зоне сжатия – сжимаются. Деформация слоев убывает от внешних поверхностей к нейтральному слою, в котором деформация отсутствует.

Если обозначить длину (по окружности) наружного слоя –  $L_H$ , длину внутреннего слоя –  $L_B$ , а длину нейтрального волокна –  $L_0$ , то степень деформации растяжения наружного волокна будет:

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_H - L_0}{L_0},$$

а степень деформации сжатия внутреннего волокна

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_B - L_0}{L_0}, \quad (3.2)$$

где знак «-» указывает на отрицательное изменение размера (уменьшение).

Абсолютная деформация тела, находящегося под нагрузкой, всегда включает в себя упругую деформацию и пластическую деформацию:

$$\Delta L = \Delta L_y + \Delta L_{nl}.$$

После снятия нагрузки упругая деформация исчезает, и изменение размеров тела определяется только его пластической (остаточной) деформацией.

В рассматриваемом случае изгиба полосы наружное волокно получило абсолютное удлинение на  $\Delta L$ , а внутреннее – абсолютное сжатие на  $\Delta L$ . После снятия внешней нагрузки вследствие исчезновения упругой деформации  $\Delta L_y$  остаточная деформация волокон будет меньше абсолютной:

$$\Delta L_{nl} = \Delta L + \Delta L_y.$$

Это означает, что по сравнению с состоянием нагружения, длина наружного волокна уменьшается, а внутреннего волокна – увеличивается. Это приводит к изменению геометрии согнутой полосы – полоса «распружинивается», увеличивая угол по сравнению с тем, на который она была согнута (рис. 3.3).

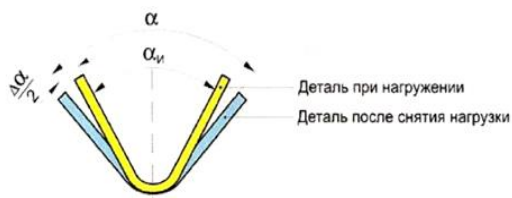


Рис. 3.3. Изменение формы детали при гибке

Угол  $\Delta\alpha$ , на который деталь распружинивается при гибке, называется углом пружинения. Его нужно учитывать при проектировании гибочных пуансона и матрицы для того, чтобы после операции гибки получить деталь с заданным углом  $\alpha$ :

$$\alpha_u = \alpha - \Delta\alpha, \quad (3.3)$$

где  $\alpha_u$  – угол инструмента;  $\alpha$  – заданный угол детали.

Угол пружинения зависит от механических характеристик материала, его толщины, радиуса и угла гибки и определяется по формуле

$$\Delta\alpha = 3 \frac{\sigma_m}{E} \left( \frac{r}{S} + 1 \right) \cdot \alpha, \quad (3.4)$$

где  $\sigma_m$  и  $E$  – соответственно предел текучести и модуль упругости материала;  $S$  – толщина материала;  $r$  – радиус гибки;  $\alpha$  – угол гибки.

Из формулы (3.4) видно, что материалы с большим пределом текучести (более прочные) имеют большее пружинение. Цветные сплавы, имеющие значительно меньший по сравнению со сталью модуль упругости, пружинят больше, чем сталь. Угол пружинения возрастает с увеличением относительного радиуса гибки ( $r/S$ ) и угла гибки  $\alpha$ .

Угол пружинения можно уменьшить, если производить гибку с подчеканкой (рис. 3.4, б), т.е. пластически деформировать деталь на ее радиусном участке (гибка в упор пуансоном в матрицу).

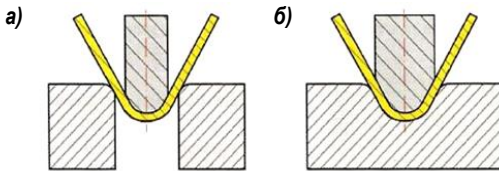


Рис. 3.4. Гибка без подчеканки (а) и с подчеканкой (б)

### Содержание работы

Изучаются особенности процесса гибки и исследуется влияние на величину угла пружинения свойств материала, его толщины, угла гибки и использования подчеканки. Для этого производится изгиб полос из различных материалов: малоуглеродистых сталей, меди и алюминиевого сплава разных толщин и с различными углами гибки.

После гибки и снятия нагрузки измеряется угол пружинения.

Производится сопоставление экспериментальных и расчетных данных, для чего теоретически определяется угол пружинения для одного из материалов.



Предел текучести и модуль упругости берутся из справочной литературы.

### Оборудование, инструмент, образцы

**Оборудование:** пресс, номинальной силой 100 кН.

**Инструмент:** специальный штамп с набором сменных матриц и пуансонов для гибки на углы  $\alpha = 60^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  и с радиусом гибки  $r = 4$  мм и  $r = 8$  мм (рис. 3.5).

**Образцы:** полосы длиной 80 мм, шириной 20 мм, толщиной 2 мм из листовой среднеуглеродистой стали, меди и алюминиевого сплава.

**Измерительный инструмент:** штангенциркуль, масштабная линейка и угломер с ценой деления  $1^\circ$ .

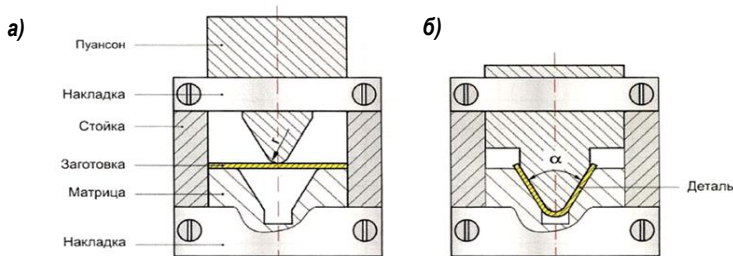


Рис. 3.5. Гибка без подчеканки (а) и с подчеканкой (б)

### Порядок выполнения работы

*Выполнить теоретические расчеты.* Определить расчетное значение угла пружинения для одного из материалов при разных значениях угла гибки и радиуса гибки.

*Выполнить экспериментальные работы:*

1. Измерить толщину  $S$  и ширину  $B$  исходных заготовок.

2. Подобрать комплект пуансон-матрица с углом инструмента –  $60^\circ$  и радиусом 4 мм.

3. Провести гибку полос из трех материалов.

4. Используя угломер, измерить угол деталей и вычислить угол пружинения, как разность углов детали и инструмента.

5. Снять пуансон с радиусом 4 мм и установить пуансон с радиусом 8 мм.

6. Повторить эксперименты по пп. 3–5.

7. Снять комплект инструмента и заменить другим – с углом  $90^\circ$ .

8. Повторить эксперименты по пп. 3–6.

*Произвести обработку полученных данных:*

1. Сравнить теоретические и фактические значения углов пружинения для разных материалов при одинаковом угле гибки и одинаковом радиусе.

2. Сравнить углы пружинения для одного и того же материала при одинаковом угле гибки, но разных радиусах гибки.

3. Сравнить углы пружинения для одного и того же материала при одинаковом радиусе гибки, но разных углах гибки. Результаты экспериментов занести в табл. 3.1.

4. Исходные, расчетные и экспериментальные данные занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Материалы	B, мм	r, мм	S, мм	$\frac{r}{S}$	$\Delta\alpha$ , град				$\Delta\alpha_{\text{эксп}}$ $\Delta\alpha_{\text{расч}}$
					эксперимент		расчет		
					$60^\circ$	$90^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	
Сталь									
Медь									
Алюминий									

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Особенностью операции гибки является распруживание изогнутой детали на угол пружинения  $\Delta\alpha$  после снятия нагрузки.

2. Угол пружинения зависит от механических свойств материала – предела текучести и модуля упругости. Чем больше предел текучести и меньше модуль упругости, тем больше пружинят металлы.

3. Угол пружинения зависит от относительного радиуса гибки ( $r/S$ ). Чем больше радиус гибки и меньше толщина материала, тем больше пружинение.

4. Угол пружинения зависит от угла гибки. При прочих равных условиях чем больше угол гибки, тем больше угол пружинения.

### Лабораторная работа №4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ОТБОРТОВКИ

### Основные сведения об отбортовке

**Отбортовка** – это операция получения горловины в плоской заготовке с предварительно пробитым отверстием.

Заготовка с предварительно пробитым в ней отверстием устанавливается на матрицу (рис. 4.1, а). При опускании пуансона ( $D_n > d_0$ ) средняя часть заготовки деформируется, образуя горловину с высотой борта, зависящей от соотношения диаметров  $D_n$  и  $d_0$  (рис. 4.1, в).

В очаге деформации действуют растягивающие напряжения – меридиональное  $\sigma_p$  и тангенциальное  $\sigma_\theta$  (рис. 4.1, б). Под действием растягивающих напряжений толщина стенки борта уменьшается, причем наибольшее утонение будет происходить на его краевой части (рис. 4.1, в).

Разрушение заготовки в процессе отбортовки (образование трещин) всегда начинается у края горловины, т.к. здесь действуют максимальные растягивающие напряжения и имеют место наибольшие деформации.

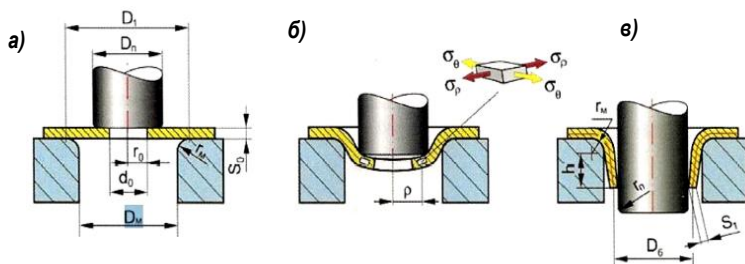


Рис. 4.1. Схема формоизменения заготовки в процессе отбортовки

Степень формоизменения при отбортовке оценивается коэффициентом отбортовки:

$$m = \frac{d_0}{D_6}, \quad (4.1)$$

где  $d_0$  – диаметр отверстия в заготовке;  $D_6$  – средний диаметр борта.

Моменту образования трещин соответствует предельный коэффициент отбортовки, который зависит от пластических свойств материала, отношения толщины заготовки  $S_0$  к диаметру исходного отверстия  $d_0$  (относительная толщина  $S_0/d_0$ ) и состояния кромки отверстия исходной заготовки. Чем меньше предельный коэффициент отбортовки, тем больший диаметр борта можно получить при данном диаметре исходного отверстия в заготовке.

Предельный коэффициент отбортовки уменьшается с увеличением пластичности материала и увеличением относительной толщины.

Состояние кромки отверстия зависит от того, получено оно пробивкой или сверлением. Если отверстие получено пробивкой, то металл у кромки отверстия будет упрочнен (наклепан), т.е. его пластичность понижена. Поэтому при использовании заготовок с предварительно пробитыми отверстиями предельный коэффициент отбортовки будет больше, чем у заготовок с отверстиями, полученными сверлением.

Если используется заготовка с пробитым отверстием, то существенным является и то, как положить такую заготовку по отношению к матрице. Боковая поверхность пробитого отверстия имеет две характерные зоны – блестящий пояс и шероховатая поверхность скола (см. лаб. раб. №2). Последняя имеет значительное количество микротрещин, и если она будет обращена к матрице, то предельный коэффициент отбортовки будет больше, чем в случае, когда заготовка ориентирована к матрице блестящим пояском. Поэтому для относительно толстостенных заготовок с пробитым отверстием для получения меньшего предельного коэффициента отбортовки их нужно укладывать на матрицу блестящим пояском вниз.

Размеры отверстия  $d_0$  в заготовке могут быть определены через геометрические размеры борта в изделии из равенства длины развертки борта и ширины отбортованной части заготовки:

$$d_0 = D_1 - 1,57 \cdot r_m - 0,78 \cdot S_0 - 2 \cdot h. \quad (4.2)$$

В процессе отбортовки происходит утонение заготовки в горловине. Толщина краевой части горловины определяется по формуле

$$S_1 = S_0 \sqrt{\frac{d_0}{D_0}}. \quad (4.3)$$

Максимальная сила отбортовки

$$P_{\max} = 1,1 \cdot \pi \cdot D_6 \cdot \left(1 - \frac{d_0}{D_6}\right) \cdot S_0 \cdot \sigma_m, \quad (4.4)$$

где  $D_6$  – средний диаметр борта;  $d_0$  – диаметр отверстия;  $S_0$  – толщина заготовки;  $\sigma_m$  – предел текучести материала.

### Содержание работы

Необходимо экспериментально определить предельный коэффициент отбортовки, усилие и работу деформирования, утонение стенки у края горловины, высоту борта при данном коэффициенте отбортовки и сопоставить расчетные параметры отбортовки с экспериментальными.

Предельный коэффициент отбортовки определяется следующим образом. Для заданных размеров пуансона и матрицы  $D_6$  производят отбортовку в заготовках с разными диаметрами  $d_0$ , т.е. изменяют коэффициент отбортовки  $m$ , начиная с наибольшего  $d_0$ . В каждой последующей заготовке уменьшают диаметр  $d_0$ , до появления мелких трещин в борте, что соответствует предельному коэффициенту отбортовки.

Опыты проводят для заготовок с пробитыми и сверленными отверстиями.

В процессе отбортовки посредством датчиков записывают силу и перемещение в функции времени, а перестроением этих графиков получают зависимость силы от перемещения.

Толщину краевой части горловины сравнивают с исходной толщиной заготовки и с расчетным значением, полученным по формуле (4.3).

Строят зависимость коэффициента отбортовки от относительной толщины.

### Оборудование, инструмент, образцы

**Оборудование:** пресс, номинальной силой 100 Кн.

**Инструмент:** специальный штамп для отбортовки с матрицей и пуансоном для изготовления борта наружным диаметром 25 мм (рис. 4.2).

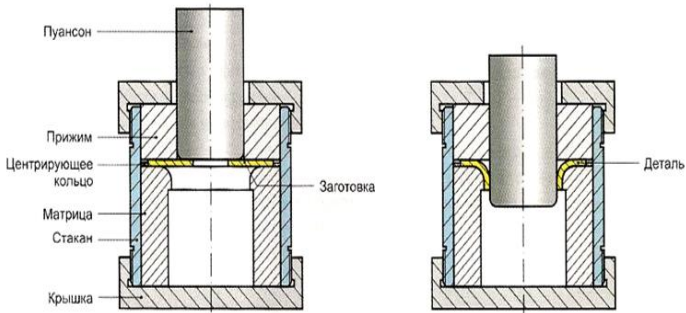


Рис. 4.2. Экспериментальное приспособление для отбортовки

**Образцы:** круглые заготовки диаметром 60 мм, толщиной 2 мм из листовой малоуглеродистой стали, мягкой отожженной меди или мягких алюминиевых сплавов с пробитыми и сверленными отверстиями диаметром 6, 10 и 15 мм.

**Измерительный инструмент:** штангенциркуль, микрометр, линза с 5-кратным увеличением, радиусомер.

### Порядок выполнения работы

*Выполнить теоретические расчеты:*

1. Для заданного диаметра  $D_b$  определить ряд диаметров  $d_0$  отверстий, принимая коэффициент отбортовки  $m$  в пределах 0,3–0,7.

2. Определить ожидаемую минимальную толщину стенки  $S_1$  краевой части борта для разных значений  $m$ .

3. Определить максимальную силу отбортовки  $P_{\max}$  для разных значений  $m$ .

*Выполнить экспериментальные работы:*

1. Разобрать штамп, сняв пуансон, фланец и прижим.  
2. Установить в матрицу заготовку с наименьшим диаметром  $d_0$  отверстия, предварительно смазав плоскость и кромку отверстия матрицы машинным маслом.

3. Собрать штамп, обеспечив касание прижима и заготовки с минимальным усилием.

4. Установить штамп в рабочую зону прессы и произвести отбортовку стакана с записью силы деформирования и перемещения пуансона.

5. Разобрать штамп, извлечь деталь.

6. Измерить диаметр и высоту борта, толщину  $S_1$  его краевой части.

7. Повторить опыты по пп. 2–4, увеличивая диаметр  $d_0$  заготовок до появления трещин в борте. Определить предельный коэффициент вытяжки, соответствующий разрушению детали.

8. Повторить опыты по пп. 2–6 для заготовок из другого материала (с другим пределом текучести).

*Произвести обработку полученных данных:*

1. Используя запись силы и перемещения во времени, построить зависимость силы деформирования по ходу вытяжки  $P = P(S)$ , сделать вывод о характере этой зависимости, определить работу деформирования.

2. Сравнить теоретические и фактические силы вытяжки.

3. Сравнить теоретические и фактические значения толщины краевой части борта. Оценить величину утонения стенки борта по сравнению с толщиной исходной заготовки.

4. Сравнить предельные коэффициенты отбортовки для разных материалов и сделать выводы о влиянии этого коэффициента на усилие отбортовки.

5. Построить графики  $P = P(m)$  и  $m = P(S_0/d_0)$ .

Исходные, расчетные и экспериментальные данные занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Материалы	$d_0$ , мм	$S_0$ , мм	$\frac{S_0}{d_0}$	$d_n$ , мм	$D_m$ , мм	$D_{\sigma}$ , мм	$h$ , мм	$S_1$ , мм		$P_{\max}$ , кН		$S_{1\text{эксп}}$ $S_0$	$m$
								расчет	эксперимент	расчет	эксперимент		
Сталь													
Медь													
Алюминий													

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Возможность изготовления горловины в плоской заготовке с предварительно выполненным в ней отверстием определяется предельным коэффициентом отбортовки.

2. В процессе отбортовки происходит утонение стенки у краевой части горловины за счет действия в этой зоне растягивающих напряжений. Превышение предельных значений этих напряжений приводит к появлению трещин по краю борта, что соответствует предельному коэффициенту отбортовки.

3. Вероятность разрушения в процессе отбортовки уменьшается при использовании более пластичных материалов, заготовок с большей относительной толщиной ( $S_0/d_0$ ), с более качественной поверхностью отверстия (сверленные и развернутые по сравнению с пробитыми), с увеличением коэффициента отбортовки.

4. Усилие отбортовки тем больше, чем меньше коэффициент отбортовки, толще материал, выше предел текучести материала и меньше радиус скругления матрицы.



## Лабораторная работа №5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ОБЖИМА

### Основные сведения об операции обжима

**Операция обжима** трубной заготовки заключается в пластическом деформировании концевой части заготовки конической матрицей, в результате чего происходит уменьшение поперечных размеров заготовки. При этом ее концевая часть получает форму конуса или конуса, переходящего в цилиндр, диаметр которого меньше диаметра исходной заготовки (рис. 5.1).

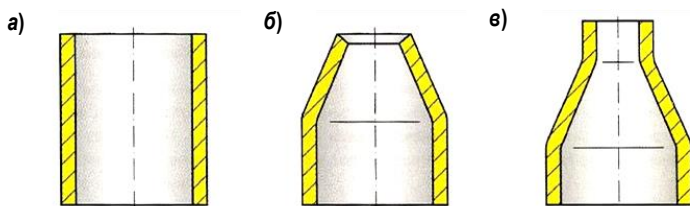


Рис. 5.1. Операция обжима: а – заготовка; б – обжим на конус;  
в – обжим на цилиндр

При обжиме заготовка затапливается в матрицу силой  $P$ , перемещаясь относительно нее в осевом направлении. Напряженное состояние в деформируемой части заготовки и обозначения размеров, принятых при расчете операции, показано на рис. 5.2.

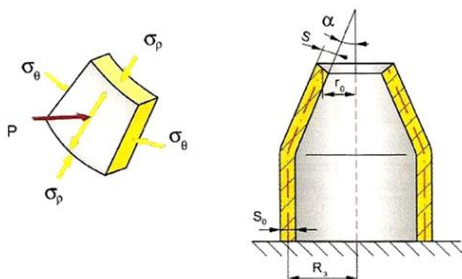


Рис. 5.2. Напряженное состояние  
в деформируемой части заготовки при обжиме

Так как размеры стенки заготовки при деформировании уменьшаются, то меридиальные напряжения  $\sigma_p$  и

тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$  будут сжимающими. Кроме того, на поверхности контакта с матрицей действуют силы трения  $\mu P$ , направленные против движения ( $\mu$  – коэффициент трения).

Под действием этих сжимающих напряжений толщина стенки конусной части увеличивается по сравнению с толщиной стенки заготовки, начиная от входа в конусную часть и достигая у свободного края максимального значения:

$$S_{\max} = S_0 \sqrt{\frac{R_s}{r_0}}. \quad (5.1)$$

Важным показателем операции обжима является коэффициент обжима:

$$K_0 = \frac{D_s}{d_0}, \quad (5.2)$$

где  $D_s$  – диаметр исходной заготовки;  $d_0$  – минимальный диаметр после обжима.

Максимальное значение коэффициента обжима определяется возможностью получения качественной детали (отсутствие разрушения и искажения правильной геометрической формы). Для обжима характерно, что предельный коэффициент обжима лимитируется не разрушением детали, а искажением ее формы, которое появляется после достижения определенной величины действующих в стенке напряжений.

Это объясняется тем, что в деформируемой части заготовки имеют место только сжимающие напряжения, а появление трещин и разрушение *происходит только под действием растягивающих* напряжений, которые в данном случае отсутствуют. Поэтому опасности появления трещин и разрушения при обжиге не возникает.

Фактором, определяющим предельный коэффициент обжима, является появление продольных складок на деформируемой (конической) части заготовки и поперечных кольцевых складок (гофр) на недеформируемой (цилиндрической) части (рис. 5.3).

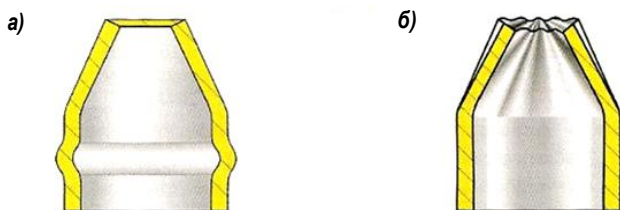


Рис. 5.3. Потеря устойчивости стенки: а – кольцевые складки, б – продольные складки

С увеличением напряжений  $\sigma_p$  растет сила деформирования  $P$  и при достижении критического значения и соответствующего значения  $P_{\max}$  появляются кольцевые складки.

Максимальная величина напряжений определяется формулой

$$\sigma_{p\max} = \sigma_s \cdot (1 + \mu \cdot \cos \alpha) \cdot \left(1 - \frac{r_0}{R_3}\right) \cdot (3 - 2 \cos \alpha), \quad (5.3)$$

где  $\sigma_s \cong \sigma_m$  – напряжение текучести;  $\mu$  – коэффициент трения.

Величина максимальных напряжений  $\sigma_{p\max}$ , вызывающих потерю устойчивости с образованием кольцевых складок, во многом зависит от относительной толщины заготовки  $S/D$  и при  $100 \cdot S/D \geq 2$  может приниматься примерно равной пределу текучести.

Для толстостенных заготовок  $\sigma_{p\max} \cong \sigma_T$ , тонкостенные заготовки теряют устойчивость раньше при достижении  $\sigma_{p\max} \cong (0,7-0,8) \sigma_T$ .

Образование продольных складок на конической части заготовки происходит под действием тангенциальных напряжений  $\sigma_\theta$ , причем вероятность возникновения этих складок возрастает с уменьшением относительной толщины стенки  $S/D$ .

Таким образом, тонкостенные заготовки при прочих равных условиях теряют устойчивость при меньших коэффициентах обжима, чем толстостенные, другими словами, имеют меньший предельный коэффициент обжима, чем толстостенные.

Часто обжим заготовки в конической матрице производится с выходом в цилиндр, в результате чего получается деталь, имеющая на концевой части цилиндрический участок с диаметром, меньшим диаметра исходной заготовки (рис. 5.4).

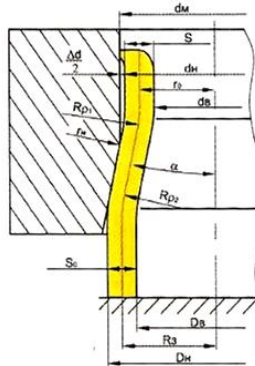


Рис. 5.4. Обжим заготовки с выходом в цилиндр

Особенностью такого процесса является то, что на переходе с конической части в цилиндрическую стенка заготовки изгибается радиусом свободного изгиба  $R_{\rho 1}$  и теряет контакт со стенкой матрицы, в результате чего между заготовкой и матрицей образуется зазор  $Z$ :

$$2Z = \Delta d = d_m - d_n = (2R_{\rho 1} - S - 2r_m) (1 - \cos \alpha), \quad (5.4)$$

где  $R_{\rho 1} = \sqrt{\frac{S \cdot r_0}{2} \cdot \frac{1}{\sin \alpha}}$ , радиус свободного изгиба стенки заготовки на выходе из очага деформации, остальные обозначения указаны на рисунке.

Из формулы (5.3) видно, что на напряжения, а следовательно, и на силу деформирования влияет угол конуса матрицы. Оптимальная величина угла  $\alpha$ , при которой напряжения  $\sigma_{\rho \max}$  и соответственно сила деформирования  $P$  получаются минимальными, определяется формулой

$$\sin \alpha_{opt} = \sqrt[3]{\frac{\mu}{2}}, \quad (5.5)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

Сила деформирования при обжиге

$$P_{\max} = 2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot S_0 \cdot \sigma_{\rho \max}. \quad (5.6)$$

## Содержание работы

Необходимо изучить постадийное формоизменение заготовки при обжиге, установить влияние угла конусности матрицы на силу деформирования и напряжение  $\sigma_{\text{рmax}}$  и определить условия, при которых заготовка теряет устойчивость.

Обжим проводят на трубчатых заготовках из меди или алюминия в матрицах с углом конусности  $20^\circ$  и  $30^\circ$ , в качестве смазки используют масло.

В процессе обжима записывают индикаторную диаграмму нагружения в координатах «сила–путь» постадийно, через каждые 5 мм, фиксируя силу деформирования в конце каждой стадии. Для каждой заготовки процесс доводят до потери устойчивости складкообразования. Соответствующий коэффициент обжима является предельным.

Измеряют наружный  $d_n$  и внутренний  $d_s$  диаметры обжатых заготовок, определяют толщину стенки  $S_{\text{max}}$  и диаметральный зазор  $\Delta d$  между стенкой матрицы и поверхностью заготовки.

Устанавливают наибольший коэффициент обжима, при котором заготовка теряет устойчивость с образованием поперечных складок (гофр). При постадийном деформировании эскизируют *изменение* формы заготовки.

Экспериментальные значения зазора  $\Delta d$  максимальной толщины стенки обжатой цилиндрической части заготовки  $S_{\text{max}}$  напряжения  $\sigma_{\text{рmax}}$  сравнивают с расчетными значениями. Коэффициент трения  $\mu$  берется в пределах 0,1...0,15.

### Оборудование, инструмент, образцы

**Оборудование:** гидравлический пресс силой 100 кН.

**Инструмент:** приспособление для обжима с набором сменных матриц с углами конусности:  $20^\circ$  и  $30^\circ$  (рис. 5.5).

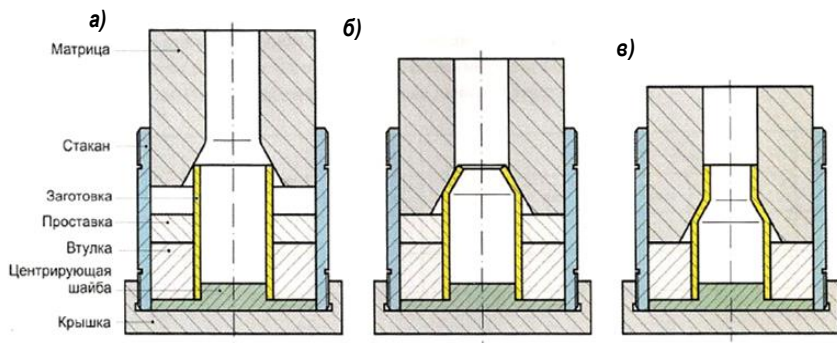


Рис. 5.5. Специальное приспособление для обжима: а – заготовка; б – обжим на конус; в – обжим на цилиндр

**Измерительный инструмент:** штангенциркуль, микрометр, масштабная линейка, угломер.

**Образцы:** заготовки из трубы с наружным диаметром 30 мм, толщиной стенки 2 мм и длиной 45 мм. Материал – медь или алюминий.

### Порядок выполнения работы

*Выполнить теоретические расчеты:*

1. По формуле (5.5) определить оптимальный угол конуса матрицы.
2. По формуле (5.6) определить максимальную силу деформирования, принимая напряжение  $\sigma_{pmax} = \sigma_m$ .

*Выполнить экспериментальные работы:*

1. Измерить толщину стенки  $S_0$  и наружный диаметр  $d_h$  исходных заготовок.
2. Установить в приспособление заготовку и сменную матрицу с углом конуса  $20^\circ$ , предварительно смазав наружную поверхность заготовки и внутреннюю полость матрицы машинным маслом.
3. Установить экспериментальное приспособление на пресс и провести обжим заготовки, записывая при этом изменение силы деформирования по ходу в координатах «сила–путь». Деформирование производить поэтапно, через каждые 5 мм хода, эскизируя при этом формоизменение заготовки.

4. После каждого этапа извлечь заготовку, измерить наружный  $d_n$ , и внутренний  $d_e$  диаметры полученной заготовки и найти толщину стенки  $S_{max}$ . Процесс довести до потери устойчивости стенки. На каждом этапе определить коэффициент обжима.

5. Повторить эксперименты по пп. 1–5, используя матрицу с углом  $30^\circ$ .

*Выполнить обработку полученных данных:*

1. По усилию  $P_{эксн}$  в конце каждого этапа деформирования по формуле определить напряжение  $\sigma_{рmax}$  и сравнить с пределом текучести  $\sigma_m$ .

2. Для каждого этапа определить соответствующий коэффициент обжима, расчетную толщину стенки и сравнить с экспериментальными значениями.

3. Исходные, расчетные и экспериментальные данные занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$\alpha$ , град	$D_h$ мм	$S_0$ , мм	$R_3$ , мм	$d_m$ , мм	$P_{max}$ расчет, кН	$\sigma_{рmax}$ , кН/см <sup>2</sup>		$d_n$ , мм	$D_e$ , мм	$\Delta d$ , мм		$S_{max}$ , мм		$r_0$ , мм	$K_0$
						расчет	экспе- римент			расчет	экспе- римент	расчет	экспе- римент		

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Предельное формоизменение заготовки при обжиге ограничивается потерей устойчивости стенки заготовки с появлением продольных или поперечных складок.

2. Максимальное значение коэффициента обжима, при котором формоизменение происходит без потери устойчивости стенки, находится в пределах 1,3–1,4.

3. С увеличением угла конуса матрицы сила деформирования увеличивается, а коэффициент обжима уменьшается. Оптимальный угол конуса матрицы примерно равен  $20^\circ$ .

Толщина стенки деформируемой части заготовки увеличивается по сравнению с исходной и тем больше, чем больше коэффициент обжима.

## Лабораторная работа №6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ РАЗДАЧИ

#### Основные сведения об операции раздачи

**Операция раздачи** трубной заготовки состоит в пластическом деформировании концевой части заготовки коническим пуансоном, в результате чего происходит увеличение ее диаметральных размеров. Концевая часть заготовки получает форму усеченного конуса (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Заготовка (а) и деталь, полученная в результате операции раздачи (б)

При раздаче конический пуансон перемещается относительно заготовки в осевом направлении и внедряется в заготовку, преодолевая ее сопротивление силой деформирования  $P$ .

Напряженное состояние в очаге пластической деформации и обозначения размеров, принятых при расчете операции, показаны на рис. 6.2.

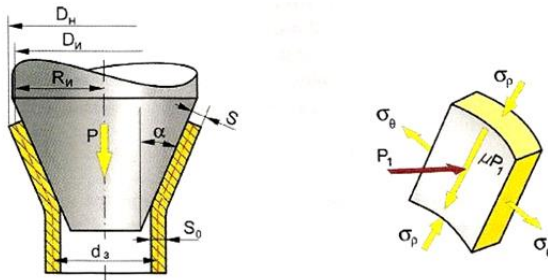


Рис. 6.2. Напряжения в заготовке при операции раздачи

Так как пуансон внедряется в заготовку в осевом направлении, то в стенках возникают меридиональные сжимающие напряжения  $\sigma_\rho$ , действующие вдоль образу-



щей. На краю (на диаметре  $D_n$ ) эти напряжения равны нулю, поскольку на свободной поверхности отсутствует деформирующая сила.

Напряжения  $\sigma_r$  увеличиваются по мере приближения к цилиндрической (недеформируемой) части заготовки и достигают максимальных значений в конце очага деформаций на границе с недеформируемой частью заготовки.

Поскольку в процессе деформации увеличиваются диаметральные размеры заготовки, то в стенке возникают растягивающие тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$ . Эти напряжения изменяются от максимума на краю конической части с диаметром  $D_n$  до минимума на границе перехода от конической части заготовки к цилиндрической.

Таким образом, схема напряженного состояния в очаге деформации плоская разноименная – сжимающие напряжения  $\sigma_r$  и растягивающие напряжения  $\sigma_\theta$ .

Кроме того, на контактной поверхности пуансона и заготовки действуют силы трения  $\mu P_1$ , которые увеличивают сжимающие напряжения  $\sigma_r$ . Применяя различные виды смазок на контактной поверхности, можно уменьшить величину напряжения  $\sigma_r$ .

Предельное формоизменение, т.е. обеспечение максимального диаметра  $D_n$  ограничивается появлением разрушения (трещин) на конической части заготовки (рис. 6.3, а) или потерей устойчивости стенки на цилиндрической части с появлением кольцевых складок (рис. 6.3, б).

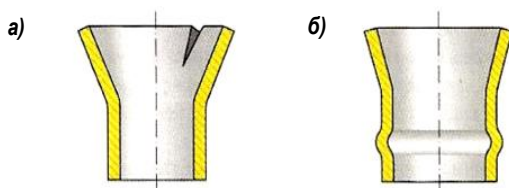


Рис. 6.3. Проявление разрушений при раздаче

Трещина появляется за счет действия растягивающих тангенциальных напряжений, которые на краю заготовки достигают напряжения текучести  $\sigma_s$ .

Кольцевая складка появляется за счет действия сжимающих меридиональных напряжений, которые мо-

гут достигнуть предела текучести  $\sigma_m$ . Это может произойти, если коэффициент трения на контактной поверхности достаточно велик ( $\mu = 0,3-0,5$ ), а также, когда угол конуса  $\alpha$  больше оптимального (равного  $15-25^\circ$ ), например,  $\alpha = 400-450$  и более.

Коэффициент раздачи определяется отношением диаметра краевой части заготовки после деформирования  $D_u$  к диаметру исходной заготовки  $d_3$ :

$$K_P = \frac{D_u}{d_3}. \quad (6.1)$$

Обычно предельный коэффициент раздачи составляет  $1,3-1,4$ . Он тем больше, чем пластичнее материал, больше относительная толщина стенки  $S_0/r_3$ , больше угол конуса  $\alpha$ .

В процессе деформирования толщина стенки краевой части заготовки уменьшается за счет растяжения и в конечный момент деформирования ее величину можно определить по формуле

$$S = S_0 \sqrt{\frac{r_3}{R_u}}. \quad (6.2)$$

Максимальное меридиональное напряжение, действующее на границе деформируемой и недеформируемой части заготовки, определяется формулой

$$\sigma_{\rho_{\max}} = \sigma_s \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot \left( \frac{R_u}{r_3} - 1 \right) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha) \cdot \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{r_3}{R_u} \right). \quad (6.3)$$

Напряжение текучести  $\sigma_s$  можно определить по формуле

$$\sigma_s = \sigma_m \cdot \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{R_u}{r_3} \right), \quad (6.4)$$

где  $\sigma_m$  – предел текучести материала.

Как видно из формул (6.3) и (6.4), напряжение  $\sigma_{\rho_{\max}}$  возрастает с увеличением коэффициента раздачи, коэффициента трения и зависит от угла конуса.

Оптимальный угол  $\alpha_{\text{opt}}$ , при котором напряжение  $\sigma_{\rho_{\max}}$  имеет минимальную величину, составляет приблизительно  $15-25^\circ$ .

Максимальная сила деформирования при раздаче

$$P_{\max} = 2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot S_0 \cdot \sigma_{\rho\max}. \quad (6.5)$$

### Содержание работы

Необходимо изучить формоизменение заготовки при раздаче, установить влияние степени деформации и величины коэффициента раздачи на силу деформирования и напряжения  $\sigma_{\rho\max}$ , определить предельное значение коэффициента раздачи, при котором образуются продольная трещина на конусной части или кольцевая складка на цилиндрической части заготовки.

Раздачу производят на трубных заготовках из меди или алюминия коническим пуансоном с углом конусности  $20^\circ$ , в качестве смазки используют машинное масло. В процессе раздачи записывают индикаторную диаграмму нагружения в координатах «сила–перемещение» поэтапно, через каждые 5 мм, фиксируя силу деформирования в конце каждой стадии.

Измеряют наружный диаметр  $D_n$  и толщину  $S$  для каждой стадии, останавливая процесс, проводя соответствующие измерения и фиксируя силу деформирования.

Находят максимальный диаметр при раздаче, при котором появляется продольная трещина. Соответствующий коэффициент раздачи является предельным.

Экспериментальные значения толщины стенки заготовки после раздачи и напряжения  $\sigma_{\rho\max}$  сравнивают с расчетными. Величину коэффициента трения рекомендуется принимать  $\mu = 0,15$ , предел текучести  $\sigma_m$  – по справочной литературе для испытываемого материала [4].

### Оборудование, инструмент, образцы

**Оборудование:** гидравлический пресс силой 100 кН.

**Инструмент:** приспособление для раздачи с набором сменных вставок для ограничения хода на разных стадиях раздачи и коническим пуансоном (угол конусности  $20^\circ$ ) (рис. 6.4).

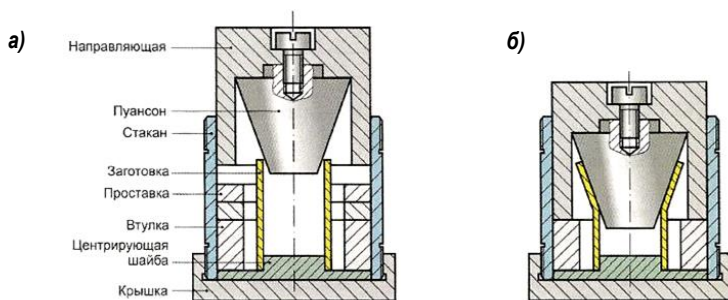


Рис. 6.4. Специальные приспособления для раздачи

**Образцы:** заготовки из трубы с наружным диаметром 30 мм, толщиной стенки 1,5–2 мм и длиной 48 мм. Материал – медь или алюминий.

### Порядок выполнения работы

*Выполнить экспериментальные работы:*

1. Измерить толщину стенки  $S_0$  и наружный диаметр  $d_n$  исходной заготовки.

2. Установить в экспериментальное приспособление заготовку и полный комплект сменных вставок, предварительно смазав внутреннюю поверхность заготовки и поверхность пуансона машинным маслом.

3. Установить приспособление в пресс и провести раздачу заготовки до упора направляющей в верхнюю вставку, записывая при этом силу деформирования и перемещение. Зафиксировать конечные значения силы и перемещения.

4. Извлечь заготовку, измерить наружный диаметр  $D_n$ , толщину стенки краевой части заготовки  $S$  и высоту заготовки  $H_1$ .

5. Повторить пп. 2–4, последовательно снимая сменные вставки. На каждом из этапов записывать силу и перемещение, а также производить измерения согласно п. 4.

6. Установить предельное формоизменение при раздаче, соответствующее появлению трещины, и зафиксировать соответствующие силовые и геометрические параметры.

Выполнить теоретические расчеты:

1. Определить коэффициент раздачи для каждого этапа деформирования.

2. Найти расчетное значение толщины стенки краевой части заготовки.

3. Установить экспериментальное значение напряжения, используя полученное при эксперименте значение силы  $P_{\max}$ .

4. Найти расчетное значение напряжения.

Размеры заготовки, результаты расчетов и экспериментов занести в табл. 6.1, дать оценку изменения толщины стенки заготовки и напряжений в функции коэффициента раздачи.

Таблица 6.1

№ этапа	Заготовка, мм					Эксперимент							Расчет		K	$\frac{\sigma_{\max, \rho}}{\sigma_{\max, \varepsilon}}$	$\frac{S_{\rho}}{S_{\varepsilon}}$
	$d_n$ мм	$S_0$ мм	$D_s$ мм	$R_s$ мм	$H_0$ мм	$P_{\max}$ кН	$\sigma_{\max, \varepsilon}$ кН/см <sup>2</sup>	$D_n$ мм	$S_{\varepsilon}$ мм	$R_u$ мм	$H$ мм	$\sigma_{\max, \rho}$ кН/см <sup>2</sup>	$S_{\rho}$ мм				

По табличным данным построить графики зависимостей  $\sigma_{\max} = f(K)$  и  $S/S_0 = f(K)$ .

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. В процессе раздачи уменьшается толщина стенки краевой части заготовки.

2. Основной количественной характеристикой операции раздачи является коэффициент раздачи, показывающий относительное увеличение диаметра заготовки.

3. Предельное значение коэффициента раздачи ограничивается появлением дефектов – продольных трещин на раздаваемой части заготовки или кольцевых складок на цилиндрической недеформируемой части заготовки.

4. С увеличением степени деформации (коэффициента раздачи) увеличивается сила деформирования, напряжения и уменьшается толщина стенки краевой части заготовки.

## Лабораторная работа №7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОСАДКЕ

#### Основные сведения

**Осадка** – операция обработки давлением, при которой заготовка сжимается между параллельными плитами, в результате чего высота заготовки уменьшается, а ее поперечные размеры увеличиваются (рис. 7.1).

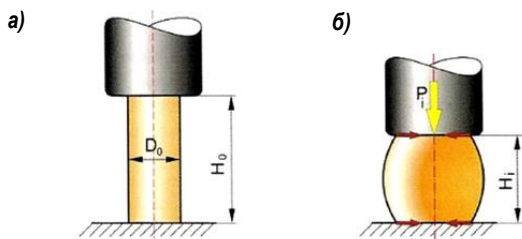


Рис. 7.1. Деформирование заготовки в результате осадки

На рис. 7.1 показана исходная цилиндрическая заготовка диаметром  $D_0$  и высотой  $H_0$  (см. рис. 7.1, а) и промежуточная стадия осадки, когда высота заготовки уменьшилась до значения  $H_i$  (см. рис. 7.1, б). На заготовку действует деформирующая сила  $P_i$  и силы трения на контактных поверхностях заготовки и инструмента (плит).

Силы трения сдерживают течение металла в радиальном направлении, в связи с чем радиальная деформация слоев, примыкающих к контактной поверхности, будет меньше, чем слоев в средней части заготовки. В результате исходная цилиндрическая форма заготовки искажается, приобретая бочкообразность, которая зависит от величины сил трения. При хорошей смазке контактных поверхностей (малые силы трения) бочкообразность невелика.

В процессе осадки заготовка проходит две стадии деформирования.

Деформация может быть упругая (исчезающая после снятия нагрузки) и пластическая (остающаяся после снятия нагрузки). При увеличении нагрузки упругая дефор-

мация переходит в пластическую. Пластическая деформация при осадке образца под действием внешней силы  $P_i$  количественно может быть определена величиной степени деформации, которая рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{H_0 - H_i}{H_0}, \quad (7.1)$$

где  $H_0$  – начальная высота образца (заготовки);  $H_i$  – высота образца после его деформации под действием силы  $P_i$ .

Способность материалов необратимо деформироваться без разрушения под действием внешних сил называют *пластичностью*. Это основной фактор, определяющий возможность формоизменения заготовки обработкой давлением. Пластичность материала количественно может быть определена максимальной степенью деформации ( $\varepsilon_{\max}$ ), выше которой металл разрушается. Например, при осадке образца

$$\varepsilon_{\max} = \frac{H_0 - H_k}{H_0}, \quad (7.2)$$

где  $H_k$  – минимальная высота образца, при которой начинается его разрушение.

Сопrotивление деформированию оценивают величиной удельной силы (напряжения), вызывающей пластическую деформацию заготовки. Сопrotивление деформированию материала количественно определяется величиной напряжения:

$$\sigma_{\max} = \frac{P_i}{S_i}, \quad (7.3)$$

где  $S_i$  – площадь поперечного сечения образца, образовавшаяся после осадки под действием силы  $P_i$ .

Пластичность и сопротивление деформированию существенно зависят от температуры. С увеличением температуры заготовки пластичность увеличивается, а сопротивление деформированию уменьшается. Кроме того, на значение сопротивления деформированию заготовки значительное влияние оказывает величина степени деформации.

Основные конструкционные материалы (сталь, цветные металлы и их сплавы) являются поликристаллическими телами, т.е. состоят из множества кристаллитов (зерен).

Процесс пластического деформирования сопровождается изменением не только формы заготовки, но и структуры материала. В результате пластической деформации изменяется атомно-кристаллическое строение металла, форма, размеры и ориентация зерен, вследствие чего изменяются и его физико-механические свойства.

С увеличением степени деформации увеличиваются все показатели сопротивления деформированию: пределы упругости, текучести, прочность и твердость металла. Одновременно снижаются показатели пластичности, относительное удлинение и ударная вязкость (рис. 7.2).

Это явление изменения свойств в результате холодной деформации получило название *наклепа* или *упрочнения*. Состояние наклепа металла термодинамически неустойчиво, из которого он стремится перейти в более устойчивое. Процесс восстановления свойств активизируется при нагреве.



Рис. 7.2. Деформирование заготовки в результате осадки

Повышение температуры заготовки увеличивает подвижность атомов, которые получают возможность перестроения. Вместо вытянутых зерен, которые получились при холодной деформации, образуются равноосные зерна. Это явление называется *рекристаллизацией*, в результате которой наклеп практически полностью снимается и свойства материала приближаются к исходным значениям.

В зависимости от соотношения температурно-скоростных условий деформирования и температуры рекристаллизации металла заготовки различают холодную и горячую деформации.



**Холодной деформацией** называют такую, которую проводят при температуре ниже температуры рекристаллизации, равной  $T_{рек} \approx 0,4T_{пл}$ , поэтому холодная деформация сопровождается наклепом (упрочнением) заготовки.

Деформацию называют **горячей** в том случае, если ее проводят при температурах выше температуры рекристаллизации. При горячей деформации проходят процессы разупрочнения и рекристаллизации. По окончании горячей деформации упрочнение в заготовке отсутствует.

При горячей деформации заготовок сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной. Пластичность металла возрастает при нагреве, поэтому горячую обработку давлением применяют для изготовления крупных заготовок и при деформировании высокопрочных малопластичных материалов.

Величина наклепа или его отсутствие может быть определена различными методами, наиболее простым из которых являются неразрушающие испытания на твердость.

**Твердость** – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, недеформирующегося тела. Значение твердости и ее размерность для одного и того же материала зависят от применяемого метода измерения. Твердость по Бринеллю (НВ) определяют на твердом теле (рис. 7.3).

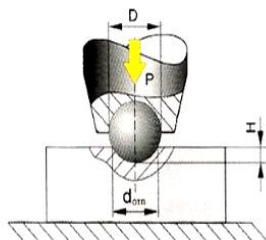


Рис. 7.3. Измерение твердости по Бринеллю

Твердость по методу Бринелля (ГОСТ 9012–59) измеряют вдавливанием в испытываемый образец стального шарика определенного диаметра  $D$  под действием заданной нагрузки  $P$  в течение определенного времени. В результате вдавливания шарика на поверхности образца по-

лучается отпечаток (лунка). Число твердости по Бринеллю, обозначаемое  $HB$ , представляет собой отношение нагрузки  $P$  к площади поверхности сферического отпечатка и измеряется в МПа. Так как глубину отпечатка  $H$  измерить трудно, а проще измерить диаметр отпечатка  $d_{omn}$ ,  $H$  выражают через диаметр шарика  $D$  и отпечатка  $d_{omn}$ .

### Содержание работы

Необходимо установить зависимость между напряжениями и деформациями при осадке цилиндрического образца, зависимость твердости материала от степени деформации, оценить степень упрочнения (наклепа) материала.

Для этого производят поэтапную осадку образца, фиксируя на каждом этапе по показаниям датчика силы величину силы деформирования  $P_i$  и замеряя высоту образца  $H_i$ . На каждом этапе производят также замер твердости образца на твердомере Бринеля –  $HB_i$ .

Значение силы на каждом этапе используют для расчета напряжения  $\sigma$  по формуле (7.3), а по начальной и текущей высоте образца определяют степень деформации  $\varepsilon$  по формуле (7.1).

### Оборудование, инструмент, образцы

**Оборудование:** пресс, номинальной силой 100 кН.

**Инструмент:** экспериментальное приспособление для штамповки (см. лаб. раб. №8) (рис. 7.4).

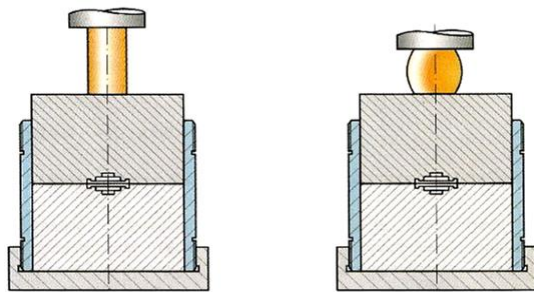


Рис. 7.4. Приспособление для операции осадки

**Образцы:** отожженные цилиндрические образцы из малоуглеродистой стали, диаметром 15 мм, высотой 25 мм.

**Измерительный инструмент:** штангенциркуль, масштабная линейка, твердомер Бринелля.

### Порядок выполнения работы

*Выполнить экспериментальные работы:*

1. Установить на пресс приспособление для штамповки (в сборе).

2. Установить на приспособление предварительно отожженный образец.

3. Произвести 1 стадию осадки образца (5 мм), отметить конечную силу  $P_1$  деформирования на этой стадии.

4. Снять образец, измерить его высоту  $H_1$  и диаметры по торцу и в середине.

5. Произвести замер твердости  $HB_1$  образца на твердомере Бринелля.

6. Произвести 2 стадию осадки образца, дополнительно осадив его на 5 мм и выполнить пп. 3–5.

7. Последовательно выполнять постадийную осадку образца до значения конечной силы деформирования  $P = 100$  кН.

8. Один образец непрерывно осадить до конечной силы 100 кН с записью силы и перемещения.

Экспериментальные данные занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Марка материала	№ осадки	$H_0$ , мм	$P_i$ , Н	$H_i$ , мм	$\varepsilon$ , %	$S_i$ , мм <sup>2</sup>	$\varepsilon$ , кН/см <sup>2</sup>	$d_{\text{омн}}$ , мм	HB

*Произвести обработку полученных данных:*

1. Используя запись силы и перемещения, построить зависимость силы деформирования по ходу осадки  $P = f(S)$  и сделать вывод о характере этой зависимости, определить работу деформирования.

2. Используя данные о начальной высоте образца и его текущей высоте на каждой стадии осадки, определить соответствующую степень деформации.

3. Используя данные о силе и средней площади сечения образца на каждой стадии осадки, определить соответствующие напряжения.

4. По величине отпечатков на образце определить соответствующую твердость на каждой стадии осадки.

5. Построить графики  $\sigma = f(\varepsilon)$  и  $HB = f(\varepsilon)$ .

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. В процессе осадки форма цилиндрического образца приобретает бочкообразность, зависящую от величины сил трения на контактных поверхностях инструмента и заготовки.

2. В процессе холодной деформации (осадки) материал упрочняется: с увеличением степени деформации возрастает сила, необходимая для дальнейшего деформирования и, соответственно, увеличиваются напряжения.

3. В процессе холодной деформации с увеличением степени деформации изменяются механические свойства материала, в частности, увеличивается твердость.

## **Лабораторная работа №8**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ**

#### **Основные сведения об операции объемной штамповки**

**Объемная штамповка** – вид обработки давлением, при котором пластическое деформирование металла осуществляется в специальном инструменте – штампе.

Из различных схем штамповки наиболее часто применяют схему, при которой штамп состоит из двух частей, а плоскость разъема между ними – горизонтальная. Такие штампы называют *открытыми*.

Верхняя половина штампа обычно закрепляется на подвижной части штамповочного оборудования (ползун пресса, баба молота), а нижняя – на неподвижной (стол пресса, шабот молота). В каждой из частей штампа выполнены углубления, которые в сомкнутом состоянии об-

разуют полость (ручей), соответствующую форме получаемого изделия – поковке.

На рис. 8.1, а показано исходное (раскрытое) положение штампа, на рис. 8.1, б – промежуточная стадия штамповки при деформации заготовки на величину  $h_i$ .

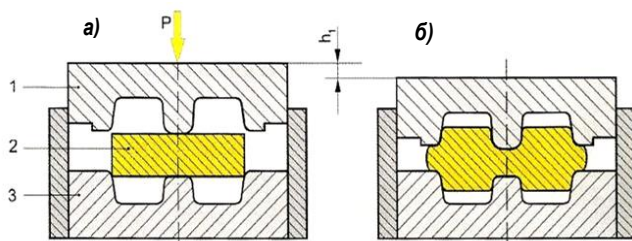


Рис. 8.1. Открытый штамп: первый этап штамповки

В качестве исходных заготовок для объемной штамповки в большинстве случаев используют прокат круглого или квадратного сечения. В кузнечно-штамповочные цехи прокат поступает в виде прутков длиной 4...6 м. Прутки нужного диаметра (или стороны квадрата) разрезают на штучные заготовки требуемой длины (требуемого объема). Перед горячей объемной штамповкой заготовки нагревают в газовых печах или электронагревательных установках до температуры штамповки (для стали – около 1200 °С) и затем штампуют на прессах, молотах или другом штамповочном оборудовании.

Заготовку 2 устанавливают в нижнюю половину штампа 3. При опускании верхней половины 2 под действием силы  $P$  происходит пластическое деформирование заготовки и металл заполняет полость штампа.

Процесс заполнения штампа можно расчленить на три характерных этапа.

Первый этап (см. рис. 8.1) аналогичен процессу свободной осадки, которая сопровождается частичным выдавливанием металла в углубления штампа или прошивкой с образованием выемок в поковке. Он завершается, когда боковая поверхность заготовки соприкасается по периметру со стенками полости штампа.

Второй этап штамповки (рис. 8.2) характеризуется одновременным течением металла в полость штампа и частично в зазор между половинками штампа (в облойную канавку, опоясывающую внешний контур ручья).

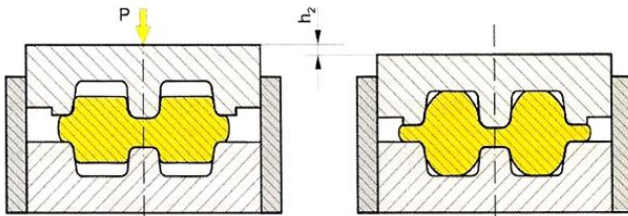


Рис. 8.2. Второй этап штамповки

С уменьшением зазора между половинками штампа сопротивление истечению металла в облой возрастает и металл заполняет полость штампа. В результате в конце второго этапа полость штампа оказывается почти полностью заполненной металлом. При этом половинки штампа еще не полностью сомкнуты, и высота поковки несколько превышает заданную.

Третий этап – этап доштамповки (рис. 8.3) – заключается в вытеснении излишков металла из полости штампа в облой 2. При полном смыкании верхней и нижней половин штампа получают поковку 1 заданной высоты.

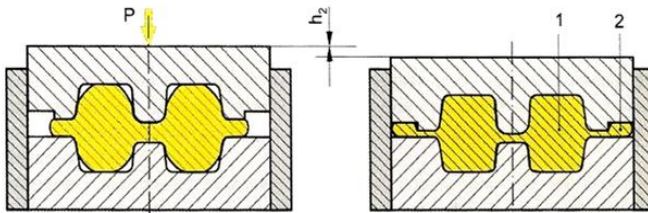


Рис. 8.3. Третий этап штамповки

Сила деформирования  $P$  на первом и втором этапах заполнения штампа увеличивается плавно, а на третьем этапе при доштамповке резко возрастает до максимального значения (рис. 8.4).

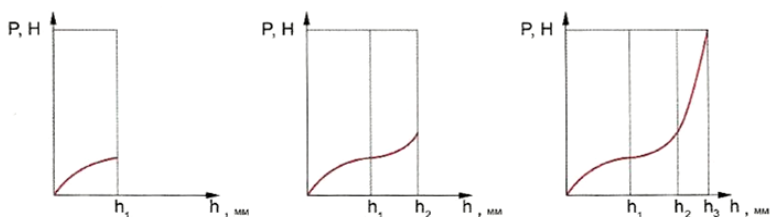


Рис. 8.4. Третий период штамповки

Сила деформирования зависит от предела текучести штампуемого материала, а также от размеров поковки и облоя.

Облой в процессе открытой штамповки играет положительную роль. Он замыкает полость штампа на поверхности разъема и обеспечивает в полости штампа давление, необходимое для ее полного заполнения металлом. Кроме того, облой воспринимает излишек металла, предусмотренный в заготовке для гарантированного заполнения штампа и компенсации колебаний объема заготовок. Масса облоя составляет в серийном производстве в среднем 16–20% от массы поковки.

Поковки сложной формы штампуют последовательно в нескольких штамповочных ручьях с постепенным приближением формы заготовки в каждом ручье к окончательной (многоручьева штамповка).

После штамповки облой обрезают в специальных обрезающих штампах на прессах. Схема обрезки облоя показана на рис. 8.5.

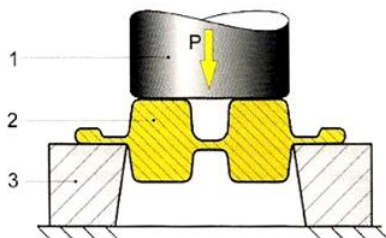


Рис. 8.5. Схема обрезки облоя: 1 – пуансон; 2 – поковка; 3 – матрица

При объемной штамповке в большинстве случаев нельзя сразу получить сквозные отверстия в поковках, по-

этому обычно делают наметку с перемычкой толщиной не менее 4 мм. При более тонкой перемычке резко возрастают удельные силы на выступах штампов, что приводит к их преждевременному износу.

После штамповки выполняют пробивку перемычек. В ряде случаев эти операции обрезки облоя и пробивки перемычек выполняют одновременно в комбинированных штампах соответствующей конструкции. Затем поковки очищают от окалины, подвергают термической обработке и т.д. После выполнения отделочных операций поковки поступают в механообрабатывающие цеха, где они служат заготовками для получения деталей машин, поступающих затем на сборку.

На поверхности поковок, для которых горячая объемная штамповка не обеспечивает требуемые точность размеров и шероховатость поверхности, назначают дополнительный слой металла (припуск) на последующую обработку резанием. Кроме того, назначают допуски на размеры поковок, которые учитывают возможную недоштамповку по высоте, износ ручьев штампов, сдвиг штампов и другие факторы. Припуски и допуски назначают в соответствии с ГОСТ 7505–89.

Если отдельные элементы поковки нельзя (или затруднительно) получить штамповкой, на соответствующих участках поковки делают напуск для упрощения ее формы. В частности, на отверстия диаметром менее 30 мм устанавливают напуск, так как стойкость выступа для получения наметки в этом случае будет очень мала, и такие отверстия целесообразней получать сверлением. Впоследствии напуск, как и припуск, удаляют обработкой резанием. После разработки чертежа поковки рассчитывают объем исходной заготовки по формуле

$$U_{заг} = U_n + U_{об} + U_{уг}, \quad (8.1)$$

где  $U_n$  – объем поковки, определяемый по чертежу поковки;  $U_{об}$  – объем облоя (при выполнении практической работы можно принять равным 18% от объема поковки  $U_n$ );  $U_{уг}$  – объем металла, идущего на угар при нагреве заготовок (при нагреве в газовой печи составляет 2%, а при электронагреве – 1% от объема поковки).



Для избежания продольного изгиба заготовки при штамповке необходимо, чтобы отношение высоты к диаметру заготовки  $K$  было менее 2,5. Обычно принимают  $K = (1,8...2,2)$ .

Зная объем заготовки и назначив  $K$ , определяют диаметр заготовки:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4U_{заг}}{\pi K}}. \quad (8.2)$$

Силу штамповки можно определить по формуле

$$P = \sigma_s \cdot F, \quad (8.3)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести;  $F$  – площадь проекции поковки в плане включая облой.

### Содержание работы

Необходимо изучить технологию объемной штамповки в открытом штампе, экспериментально наблюдать последовательное формоизменение заготовки, определить объем и размеры заготовки, силу штамповки и напряжение текучести на разных стадиях ее деформирования.

### Оборудование, инструмент, образцы

**Оборудование:** пресс, номинальной силой 100 Кн.

**Инструмент:** экспериментальное приспособление для открытой штамповки (рис. 8.6).

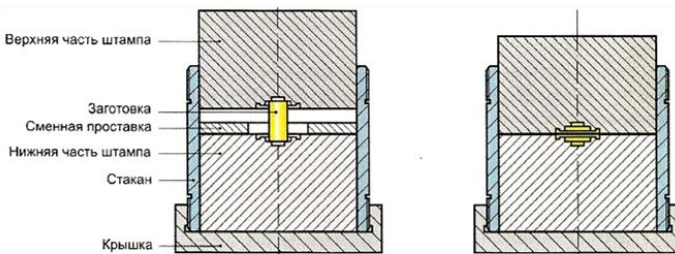


Рис. 8.6. Приспособление для открытой штамповки

**Образцы:** заготовки диаметром 8 мм, высотой 10,5 мм из алюминиевого сплава АД.

**Измерительный инструмент:** штангенциркуль, микрометр.

### Порядок выполнения работы

*Выполнить теоретические расчеты:*

1. По заданным размерам поковки определить объем поковки, объем и размеры заготовки.

2. Определить силу штамповки в предположении, что напряжение текучести в конечный момент равно пределу текучести ( $\sigma_s = \sigma_m$ ).

*Выполнить экспериментальные работы*

1. Разобрать штамп, установить на его нижнюю часть заготовку и сменную проставку, собрать штамп и установить его в пресс.

2. Произвести промежуточную стадию штамповки с замером силы.

3. Разобрать штамп, удалить поковку и сменную проставку, начертить эскиз поковки, проставить ее размеры.

4. Установить на нижнюю часть штампа поковку, собрать штамп (без проставки), установить в пресс.

5. Произвести окончательную штамповку с замером силы штамповки.

6. Разобрать штамп, удалить поковку, начертить эскиз поковки, проставить ее размеры.

*Произвести обработку полученных данных:*

1. Используя экспериментальное значение силы штамповки и площади поковки (с облоем), определить напряжение текучести на промежуточной и окончательной стадиях штамповки.

2. Сравнить значения напряжений текучести с пределом текучести на разных стадиях штамповки.

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Объемная штамповка является заготовительной операцией, в результате которой изготавливается поковка, форма и размеры которой максимально приближены к готовой детали. В дальнейшем необходимые точные размеры детали получают механической обработкой поковки (резанием).

2. Чертеж поковки составляется по чертежу готовой детали с назначением припусков, допусков и напусков, величина которых регламентирована ГОСТом.

3. По чертежу поковки определяется объем поковки, а по последнему – объем заготовки, учитывающий наличие облоя и угара металла (дополнительно примерно 18–20%).

4. По объему заготовки определяются ее размеры по соотношению высоты к диаметру  $K = 1,8-2,0$ .

5. Штамповка проходит в три стадии – свободная осадка до соприкосновения металла с боковыми стенками полости штампа; заполнение полости с вытеканием металла в облой; доштамповка для компенсации колебаний объема и износа полости штампа, когда весь избыток металла выходит в заусенец.

6. Характер изменения силы штамповки по ходу деформирования характеризуется плавным нарастанием силы на первых стадиях штамповки с резким возрастанием на стадии доштамповки.

### ***Лабораторная работа №9***

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ПРЕССОВАНИЯ**

### **Основные сведения об операции прессования**

**Прессование** – процесс обработки давлением разных материалов с целью уплотнения, изменения формы, механических и других свойств материала.

Одной из широко применяемых в прессовании технологических схем является вытеснение металла из контейнера через отверстие заданного сечения в инструменте – матрице (рис. 9.1). Таким способом получают прутки, трубы и разнообразные профили с высоким качеством поверхности и высокой точностью размеров поперечного сечения изделия.

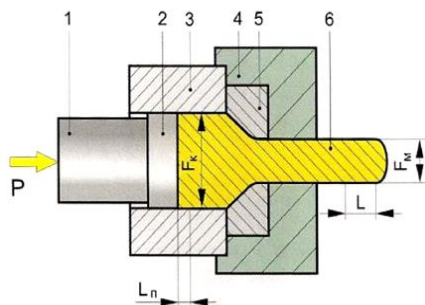


Рис. 9.1. Схема прессования

Процесс прессования состоит в следующем. Заготовку, нагретую до заданной температуры, помещают в контейнер 3. В торцевой части контейнера в специальном матрицедержателе 4 установлена матрица 5 с отверстием требуемой формы, которая формирует контур прессуемого профиля 6. С противоположного конца в контейнер вводят пуансон или пресс-штемпель 1.

На торце пуансона для предохранения его от термических воздействий и уменьшения трения о контейнер помещают пресс-шайбу 2, диаметр которой немного больше, чем у пуансона. Усилие пресса через пуансон и пресс-шайбу передается к заготовке, заставляя металл вытекать через отверстие в матрице, образуя требуемый профиль. Такое прессование называется прямым. Этим способом можно изготавливать не только сплошные профили, но и полые. В этом случае используют заготовку с предварительно полученным отверстием, либо отверстие прошивают на том же прессе уже в процессе прессования.

Общую деформацию при прессовании обычно характеризуют вытяжкой  $\mu$ , которую определяют как отношение площадей поперечного сечения контейнера  $F_k$  и отверстия в матрице  $F_m$ :

$$\mu = \frac{F_k}{F_m}. \quad (9.1)$$

Поскольку объем деформируемого металла не изменяется, вытяжку можно определять как отношение длины полученного пресс-изделия  $L$  к длине выдавленной из контей-

нера части заготовки, которая равна (в установившейся стадии процесса прессования) перемещению пуансона  $L_n$ .

Действительно,  $L_n F_k = L F_m$ , откуда  $F_k/F_m = L/L_n$  и

$$\mu = \frac{L}{L_n}. \quad (9.2)$$

На рис. 9.2 показана схема напряженного состояния при операции прессования.

Очаг пластической деформации сосредоточен в области, ограниченной двумя сферами (показано пунктиром). Выше и ниже этих сфер металл находится в жестком состоянии и перемещается без пластической деформации. Внутри очага деформации на любой выделенный элемент действуют радиальные сжимающие напряжения  $\sigma_r$ , а в осевом направлении – осевые сжимающие напряжения  $\sigma_z$ , следовательно, металл находится в условиях всестороннего сжатия. Такая схема напряженного состояния обеспечивает деформируемому металлу наиболее высокую пластичность.

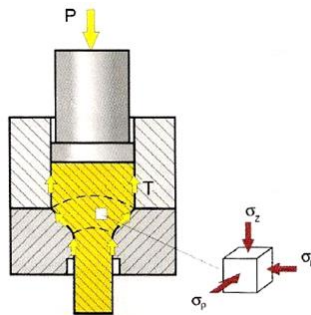


Рис. 9.2. Схема напряженного состояния при операции прессования

Из всех процессов обработки металлов давлением прессование протекает при наиболее благоприятной схеме напряженно-деформированного состояния, что позволяет получать очень большие деформации за один ход прессы. Так, вытяжка  $\mu = L/L_n$  при прессовании может быть 100 и выше.

Общая сила  $P$ , обеспечивающая выдавливание металла, складывается из силы  $P_d$ , необходимой для преодоления сопротивления металла деформации, и силы  $T$  для

преодоления трения. Силы трения действуют на контактных поверхностях металла со стенками контейнера, конуса матрицы и очка матрицы.

Составляющая общей силы прессования, идущая на преодоление сил трения, может достигать больших значений (до 30% и выше от общей силы).

Сила прессования может быть определена по формуле

$$P = F_{\kappa} \cdot \sigma_m \left( \frac{2L}{D} + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{F_{\kappa}}{F} + \frac{4\mu \cdot l}{d} \right), \quad (9.3)$$

где  $D$  и  $d$  – диаметры контейнера и очка матрицы соответственно;  $L$  и  $l$  – длина заготовки и длина цилиндрической части очка матрицы;  $\mu$  – коэффициент трения;  $\sigma_m$  – предел текучести материала;  $F_{\kappa}$  и  $F$  – сечения контейнера и изделия соответственно;  $\alpha$  – угол при вершине конуса матрицы, рад.

### Содержание работы

Необходимо изучить технологию прессования, экспериментально наблюдать последовательное формоизменение заготовки, определить коэффициент вытяжки, объем и размеры заготовки, силу прессования и напряжение текучести на разных стадиях ее деформирования.

### Оборудование, инструмент, образцы

**Оборудование:** пресс, номинальной силой 100 Кн.

**Инструмент:** экспериментальное приспособление для прессования (рис. 9.3).

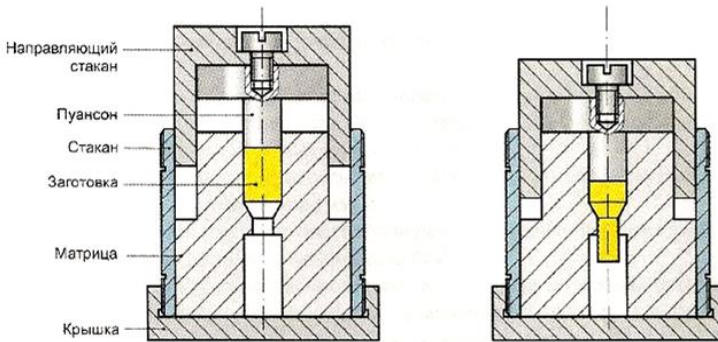


Рис. 9.3. Экспериментальное приспособление для прессования

**Образцы:** заготовки диаметром 12 мм, высотой 13 мм из алюминиевого сплава АД.

**Измерительный инструмент:** штангенциркуль, микрометр.

### Порядок выполнения работы

*Выполнить теоретические расчеты:*

1. По заданным размерам изделия определить объем и размеры заготовки.

2. Определить силу прессования.

3. Определить коэффициент вытяжки.

*Выполнить экспериментальные работы:*

1. Начертить эскиз заготовки, проставить размеры.

2. Разобрать штамп, смазать матрицу машинным маслом, установить в матрицу заготовку, собрать штамп и установить его в пресс.

3. Произвести прессование, замерить силу прессования.

4. Разобрать штамп, удалить изделие с прессостатком, начертить эскиз изделия, проставить размеры.

*Произвести обработку полученных данных:*

1. Используя экспериментальное значение силы прессования, определить напряжение текучести на контактной поверхности материала и пуансона и сравнить с пределом текучести материала.

2. Из условия разности объемов заготовки и полученного изделия (без прессостатка) определить процент отхода металла.

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Прессование является технологическим процессом обработки давлением, которым получают длинномерные изделия – профили с различной формой поперечного сечения. Форма изделия определяется формой отверстия матрицы, через которую производится выдавливание материала заготовки.

2. Прессование обеспечивает высокое качество поверхности изделия и высокую точность размеров.

3. В очаге деформации при прессовании металл подвержен всестороннему сжатию, что обеспечивает повы-

шенную пластичность, поэтому прессованием можно изготовлять изделия из высокопрочных и труднодеформируемых материалов.

4. При прессовании действуют большие силы трения материала по стенкам контейнера и матрицы, что вызывает их повышенный износ.

5. Чертеж поковки составляется по чертежу готовой детали с назначением припусков, допусков и напусков, величина которых регламентирована ГОСТом.

6. По чертежу поковки определяется объем поковки, а по последнему – объем заготовки, учитывающий наличие облоя и угара металла (дополнительно примерно 18–20%).

7. По объему заготовки определяются ее размеры по соотношению высоты к диаметру ( $K = 1,8-2,0$ ).

8. Штамповка проходит в три стадии – свободная осадка до соприкосновения металла с боковыми стенками полости штампа; заполнение полости с вытеканием металла в облой, доштамповка для компенсации колебаний объема и износа полости штампа, когда весь избыток металла выходит в заусенец.

9. Характер изменения силы штамповки по ходу деформирования характеризуется плавным нарастанием силы на первых стадиях штамповки с резким возрастанием на стадии доштамповки.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еланский, Г.Н. Основы производства и обработки металлов: учебник / Г.Н. Еланский, Б.В. Линчевский, А.А. Кальменев. – Москва: МГВМИ, 2005. – 416 с. – Текст: непосредственный.

2. Казаков, Н.Ф. Технология металлов / Н.Ф. Казаков, А.М. Осокин, А.П. Шишкова. – Москва: Металлургия, 1975. – 688 с. – Текст: непосредственный.

3. Корнилович, С.А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие / С.А. Корнилович. – Омск: Омский ГАУ, 2017. – 100 с. // Лань: электронно-библиотечная система: [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/176604> – Текст: электронный.

4. Кузнецов, В.Г. Технология конструкционных материалов. Ч. 1: учебно-метод. пособие / В.Г. Кузнецов, Р.К. Кузнецов, Ф.А. Гарифуллин. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017. – 404 с. // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/79569.html>. – Текст: электронный.

5. Лукашкин, Н.Д. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник / Н.Д. Лукашкин, Л.С. Кохан, А.М. Якушев. – Москва: Академкнига, 2003. – 456 с. – Текст: непосредственный.

6. Механическое оборудование заводов цветной металлургии. Ч. 3. Механическое оборудование цехов по обработке цветных металлов: учебник / А.А. Королев, А.Г. Навроцкий [и др.]. – Москва: Металлургия, 1989. – 624 с. – Текст: непосредственный.

7. Обработка цветных металлов и сплавов давлением / К.Н. Богоявленский, В.В. Жолобов, А.Д. Ланхидов [и др.]. – Москва: Металлургия, 1973. – 471 с. – Текст: непосредственный.

8. Суворов, И.И. Обработка металлов давлением / И.И. Суворов. – Москва: Высшая школа, 1980. – 368 с. – Текст: непосредственный.

9. Спицын, И.А. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Раздел «Горячая обработка ме-

таллов»: учеб. пособие / И.А. Спицын. – Пенза: ПГАУ, 2020. – 105 с. // Лань: электронно-библиотечная система: [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/170959>. – Текст: электронный.

10. Технология конструкционных материалов: учебник / А.М. Дальский, И.А. Арутюнова [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1977. – Текст: непосредственный.

11. Технология конструкционных материалов. Физико-механические основы обработки металлов резанием и металлорежущие станки: учеб. пособие / В.Е. Гордиенко, А.А. Абросимова, В.И. Новиков [и др.]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. – 84 с. // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/74354.html>. – Текст: электронный.

12. Шопина, Е.В. Материаловедение и технология конструкционных материалов теплотехнологического оборудования: учеб. пособие / Е.В. Шопина, А.А. Стативко. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – 110 с. // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/92263.html>. – Текст: электронный.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ.....	3
<b><i>Лабораторная работа №1</i></b> Исследование операции вытяжки.....	5
<b><i>Лабораторная работа №2</i></b> Исследование операции вырубки.....	12
<b><i>Лабораторная работа №3</i></b> Исследование операции гибки.....	21
<b><i>Лабораторная работа №4</i></b> Исследование операции отбортовки.....	27
<b><i>Лабораторная работа №5</i></b> Исследование операции обжима.....	33
<b><i>Лабораторная работа №6</i></b> Исследование операции раздачи.....	40
<b><i>Лабораторная работа №7</i></b> Исследование параметров деформирования металла при осадке.....	46
<b><i>Лабораторная работа №8</i></b> Исследование операции объёмной штамповки.....	52
<b><i>Лабораторная работа №9</i></b> Исследование операции прессования.....	59
<b>Библиографический список</b> .....	65

Компьютерная верстка Т.В. Телелева

Темплан ФБГОУ ВО «ЗГУ» 2023 г., поз. 62. Подписано в печать 27.02.2023.  
Формат 60x84 1/16. Бум. для копир.-мн.ап. Гарнитура *Bookman Old Style*.  
Печать плоская. Усл.п.л. 4,3. Уч.-изд.л. 4,3. Тираж 30 экз. Заказ 29.

663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7. E-mail: [RIO@norvuz.ru](mailto:RIO@norvuz.ru)

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в отделе ЦИТ ФБГОУ ВО «ЗГУ»