

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет Технологии машиностроения
Кафедра Технологии формоизменения и художественная обработка материалов

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Методические указания
к лабораторным работам
(часть 1)

Ростов- на - Дону
ДГТУ
2022

УДК 621.97

Составители: Е.А. Ефремова, А.С. Пасхалов, И.А. Церна

В методических указаниях приведены сведения о содержании лабораторных работ по дисциплине «Теория обработки металлов давлением», требования, предъявляемые к их оформлению и список рекомендуемой литературы.

Методические указания предназначены главным образом для бакалавров всех форм обучения направления 15.03.01 «Машиностроение» (ОПОП «Информационные технологии обработки металлов давлением»), а также магистрантов направления 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

УДК 621.97

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

Научный редактор доктор техн. наук, профессор А.В. Вовченко

Ответственный за выпуск зав. кафедрой «Технологии
формообразования и художественная обработка материалов»
канд. техн. наук, доцент Г.В. Чумаченко

В печать _____.____.20____ г.
Формат 60×84/16. Объем ____ усл.п.л.
Тираж ____ экз. Заказ № ____.

Издательский центр ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия:
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный
технический университет, 2022

Лабораторная работа № 1

1.1. Тема: определение удельных усилий и характера распределения нормальных напряжений на контактной поверхности при осадке образцов между плоскими параллельными плитами.

Почти все кузнечные и штамповочные операции содержат элементы осадки, поэтому изучение этого процесса представляет большой теоретический и практический интерес.

1.2. Цель работы: изучить влияние трения и относительной высоты осаживаемых образцов на средние удельные усилия и характер распределения нормальных напряжений при осадке.

1.3. Материальное обеспечение:

- 1.3.1. Универсально-испытательная машина ИП-500;
- 1.3.2. Полированная и шероховатая сплошные плиты;
- 1.3.3. Полированная и шероховатая сплошные плиты с узкой щелью;
- 1.3.4. Ходомер, штангенциркуль, линейка, керн;
- 1.3.5. Образцы свинцовые ($\sigma_B = 16 \div 25$ МПа) цилиндрические (6 шт.), предварительно опрессованные и проваренные в кипятке с размерами (см. рис. 1.1): $D_0 = 40$ мм (для всех образцов) с высотой $H_0 = 40; 20; 10$ мм (по два образца каждой высоты);
- 1.3.6. Парафин для смазки образцов;
- 1.3.7. Бензин или спирт для удаления смазки;
- 1.3.8 Упоры высотой: 12; 6; 3 мм.

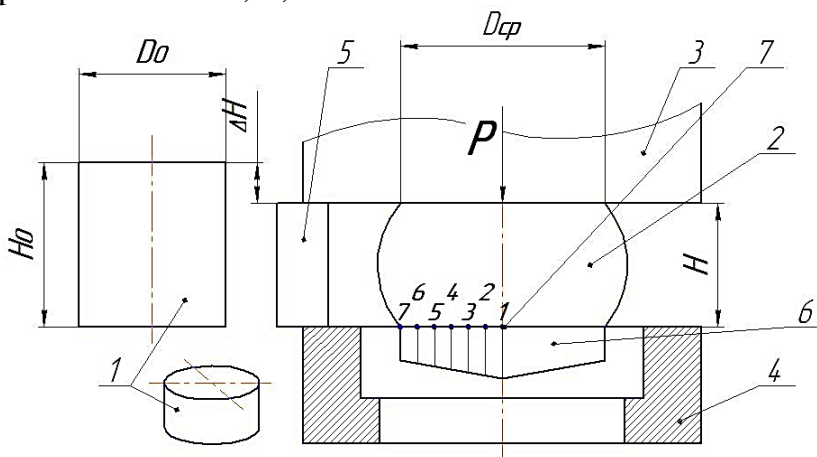


Рисунок 1.1 - Схема осадки: 1-исходный образец; осаженный образец; 3-плита сплошная; 4-плита с щелью; 5-упор; 6-торцевой заусенец; 7-точки замера высоты заусенца.

1.4. Порядок проведения работы

1.4.1. Замерить исходные высоты образцов и данные занести в таблицу 1.1.

1.4.2. На верхнем торце каждого образца начертить две взаимно перпендикулярные линии, проходящие через его центр. Концы этих линий накернить, расположив точки как можно ближе к краю образца.

1.4.3. Произвести поочередно осадку первых трех образцов на 70% между полированными плитами, смазанными парафином (см. схему усадки). После осадки осторожно извлечь заусенец из щели. Регистрировать максимальное усилие, данные занести в таблицу 1.1.

1.4.4. Произвести аналогичную осадку трех оставшихся образцов между шерховатыми, предварительно обезжиренными плитами. Регистрировать максимальное усилие, данные занести в таблицу 1.1.

1.4.5. Расчеты провести по формулам, приведенным в таблице 1.1., при этом принимать следующие значения $r = 0; D_{cp}/4; D_{cp}/2$, мм. Результаты расчетов занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 - Регистрируемые и расчетные параметры

Регистрируемые и расчетные параметры		Условия осадки					
		Полированными плитами со смазкой ($\mu = 0,03$)			Шерховатыми плитами без смазки ($\mu = 0,5$)		
		номера			образцов		
		1	2	3	4	5	6
H_0	мм						
$V_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot H_0$	мм ³						
$\Delta H = \varepsilon \cdot H_0$	мм						
P	Н						
$H = H_0 - \Delta H$	мм						
$F_k = \frac{V_0}{H}$	мм ²						
$D_{cp} = 1,13\sqrt{F_k}$	мм						
$\frac{H}{D_{cp}}$	-						
$q_{\partial} = P/F_k$	МПа						
$q_T = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu \cdot D_{cp}}{3H} \right)$	МПа						
$\sigma = \sigma_s \left[1 + \frac{2\mu}{D_{cp} H} \left(\frac{D_{cp}^2}{4} - r^2 \right) \right]$	МПа						
D_{max}/D_T	мм						
$\delta = \frac{D_{max} - D_T}{D_{max}}$	-						

1.4.6. После осадки измерить расстояние между крайними накерненными точками, характеризующими диаметр образца на торцевой поверхности – D_T , и в этой же плоскости по середине высоты образца измерить максимальный диаметр образца – D_{\max} . Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

1.4.7. Определить степень бочкообразования образцов при различных условиях осадки по формуле (результаты расчетов занести в таблицу 1.1.)

$$\delta = \frac{D_{\max} - D_T}{D_{\max}}$$

1.4.8. Построить графики зависимостей q_0 и q_T от H/D_{cp} при различных условиях контактного трения при осадке (см. рис. 1.2).

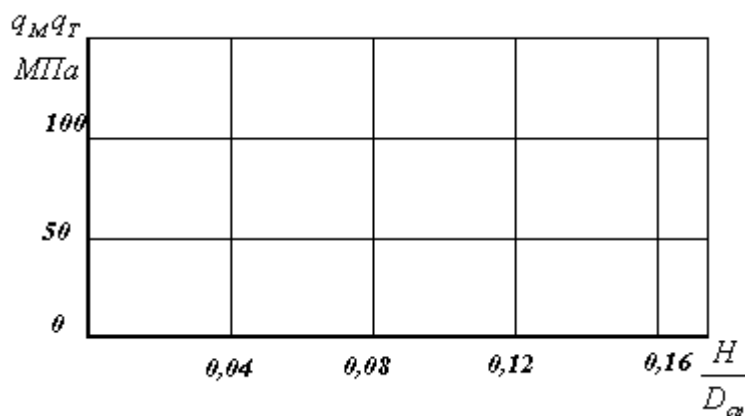


Рис.1.2 – Схема для построения графиков зависимостей q_0 и q_T от H/D_{cp}

1.4.9. Разметить (образовавшийся при затекании в цель) заусенец от центра к периферии на 6 равных частей (см. рис.1.1.) и в 7 полученных точках измерить величину затекания металла h_z для различных условий осадки. Полученные данные занести в таблицу 1. 2.

1.4.10. Построить графики (см. рис.1.3.) распределения величины заусенца по радиусу торца осаженных образцов для различных условий контактного трения и относительной их высоты H/D_{cp} .

1.4.11. Протарировать на графике вторую ось ординат в МПа, используя экспериментально полученные значения высот образовавшихся заусенцев в точке 7 при осадке образцов полированными плитами со смазкой, принимая величину заусенца равной величине нормального напряжения в этой точке для $r = D_{cp}/2$.

1.4.12. Нанести на график теоретические кривые распределения нормальных контактных напряжений (см. табл. 1.1.) при максимальном ($\mu_k = 0,5$) и минимальном ($\mu_k = 0,03$) контактных трениях, рассчитанные по формуле

$$\sigma = \sigma_s \left[1 + \frac{2\mu}{D_{cp} H} \left(\frac{D_{cp}^2}{4} - r^2 \right) \right],$$

где r – текущее расстояние точки от оси образца, для которой определяется напряжение, мм.

1.4.13. Протарировать на графике вторую ось ординат в МПа, используя экспериментально полученные значения высот образовавшихся заусенцев в точке

7 при осадке образцов полированными плитами со смазкой, принимая величину заусенца равной величине нормального напряжения в этой точке для $r = D_{cp}/2$.

Таблица 1.2 – Результаты измерений величины заусенцев.

№ образца	Высота образцов H_0 , мм	Относительная высота после осадки, H/D_{cp} , мм	Условия осадки	Величина заусенца h_z в точках, мм						
				1	2	3	4	5	6	7
1	40		Полированные ми плитами со смазкой ($\mu = 0,03$)							
2	20									
3	10									
4	40		Шероховатые плиты без смазки ($\mu=0,5$)							
5	20									
6	10									

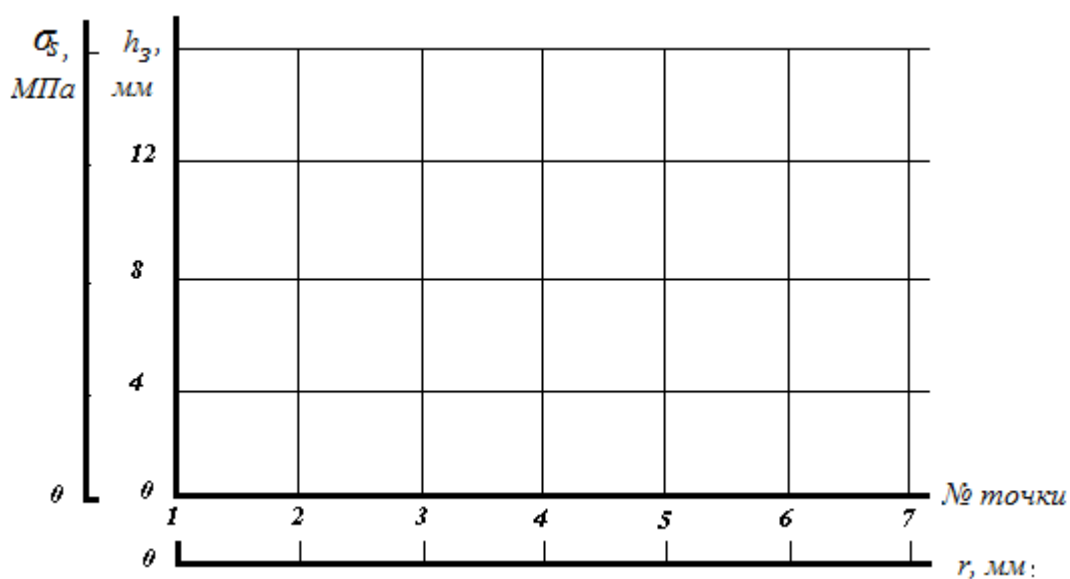


Рис.1.3 – Схема для построения графиков зависимостей распределения высоты заусенца и нормальных напряжений по торцу осажённых образцов.

1.4.12. Нанести на график теоретические кривые распределения нормальных контактных напряжений (см. табл. 1.1.) при максимальном ($\mu_k = 0,5$) и минимальном ($\mu_k = 0,03$) контактных трениях, рассчитанные по формуле

$$\sigma = \sigma_s \left[1 + \frac{2\mu}{D_{cp}H} \left(\frac{D_{cp}^2}{4} - r^2 \right) \right],$$

где r – текущее расстояние точки от оси образца, для которой определяется напряжение, мм.

1.4.13. Сделать выводы о зависимости удельных усилий и характера распределения нормальных напряжений на торцевых поверхностях образцов от относительной высоты (H/D_{cp}) и условий контактного трения при осадке. Указать влияние контактного трения на бочкообразование. Проанализировать график зависимостей распределения высоты заусенца и нормальных напряжений по торцу осаженных образцов.

1.5. Вопросы для самоконтроля

1. Как рассчитать степень деформации при осадке?
2. Чем вызвано бочкообразование при осадке?
3. Указать направление сил трения на торцах осаживаемых образцов?
4. Как изменяется цилиндрическая форма образца при осадке с наличием сил трения на торцах?
5. Осаживаются шероховатыми плитами два образца одинаковых диаметров, но разной высоты с одной и той же степенью деформации. Для какого образца усилие осадки будет большим? В каком случае средний диаметр образца после осадки окажется большим?
6. Чем удельные усилия отличаются от полных, в чем их преимущество при расчетах процессов ОМД?
7. Какая существует связь между значениями нормальных контактных напряжений при осадке и величиной торцевого заусенца?
8. Каковы схемы главных напряжений при осадке без сил трения и с наличием сил трения?

Лабораторная работа № 2

2.1. Тема: «Определение удельных усилий при затекании металла в угол закрытого цилиндрического штампа».

Одним из способов сокращения отхода металла является штамповка в закрытых ручьях: объем заготовки при этом должен быть равен объему полости ручья штампа. Если объем заготовки меньше, то отштампованные поковки будут иметь или меньшие размеры по высоте, или недооформленные участки. При объеме большем, чем объем полости ручья штампа отштампованные на молоте

поковки будут иметь увеличенные размеры по высоте, а закрытая штамповка таких поковок на прессах сопровождается резким возрастанием технологического усилия, что может приводить к заклиниванию оборудования или поломке штампа. Для предотвращения этого в штампах предусматривают, так называемые компенсаторы – небольшие камеры, в которых размещается излишний металл (отход). Для полного оформления всех элементов поковки и уменьшения отхода металла компенсаторы размещают в тех местах штампа, где заполнение его ручья происходит в последнюю очередь – на периферийных (наиболее удаленных от центра ручьях) участках. Как правило, после всего заполняются углы штампа. Чем меньше радиус угла, чем дальше расположен он от места приложения усилия, тем труднее происходит заполнение его металлом, тем большей величины требуются усилия.

2.2. Цель работы: установить характер изменения усилий при наполнении угла закрытого ручья.

2.3. Материальное обеспечение:

- 2.3.1. Универсально-испытательная машина ИП-500;
- 2.3.2. Блок с разъемной матрицей и пуансоном (рис. 2.1.);
- 2.3.3. Штангенциркуль, линейка, отвертка;
- 2.3.4. Индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм и 0,1 мм;
- 2.3.5. Свинцовый образец ($\sigma=16\dots36$ МПа), предварительно опрессованный и проваренный в кипятке с размерами (см рис. 2.1);

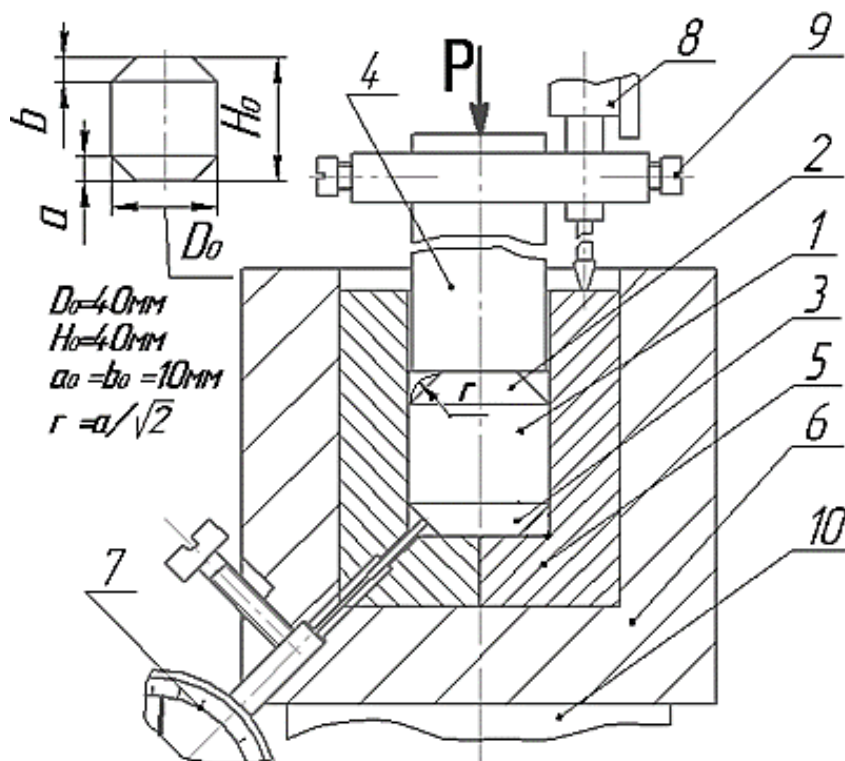


Рис. 2.1. - Схема закрытой осадки: 1 – образец; 2,3 – верхняя и нижняя фаски; 4 – пуансон; 5 – полуматрица; 6 – блок разъемный; 7 – индикаторы с ценой деления 0,01мм; 8 – индикаторы с ценой деления 0,1мм; 9 – винт опорный; 10 – опора.

2.4. Порядок проведения работы

2.4.1. Замерить высоту образца и занести в табл. 2.1.

2.4.2. Тарировать индикатор. Для этого вставить пуансон в разъемную матрицу до упора в её дно, далее поместить их в штамповый блок. В отверстие блока вставить индикатор 7 и зафиксировать его стопорным винтом. Установить шкалу индикатора на ноль.

2.4.3. Разобрать блок. Поместить в полость матрицы образец и пуансон (рис. 2.1.). Собрать блок.

2.4.4. Регистрировать по индикатору и занести в таблицу начальный радиус затекания « r_0 ». Установить на ноль индикатор 8 для измерения перемещения пуансона (см. рис. 2.1.).

2.4.5. Установить блок на машину ИП-500 и произвести деформирование образца, прилагая последовательно нагрузку $P=30, 40, 50 \div 100$ кН. После каждого нагружения регистрировать перемещение « L_n » пуансона 4 индикатором 8 (см. рис.2.1.) относительно края матрицы и радиуса затекания r_n индикатором 7 (см. рис.2.1.). Данные замеров занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Результаты измерений экспериментальных данных и теоретически расчетов.

Регистрируемые параметры	№№ нагружений (осаживания)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Усилие деформирования Р, кН								
	0	30	40	50	60	70	80	90	100
Перемещение пуансона после n-го нагружения, L_n , мм									
Высота образца после n-го нагружения, $H_{II}=H_0 - L_n$, мм	-								
Радиус затекания металла после n-го нагружения r_n , мм									
Отношение $D/2r_n$									
Экспериментальное безразмерное усилие, q_e									
Теоретическое безразмерное удельное усилие, q_t									

2.4.6. Вычислить безразмерные удельные усилия деформирования по формулам:

Экспериментальное -
$$\bar{q}_э = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot \sigma_T};$$

Теоретические -
$$\bar{q}_T = \psi \left(1 - \frac{2r_0}{D} \right)^2 + 1,426 \ln \frac{D}{4r_n} + 12 \frac{r_0}{D} - 12 \frac{r_0^2}{D^2} - 2,22 + \frac{2H_0}{D},$$

где: P – усилие n -го деформирования, МН;

D – диаметр образца;

$\sigma_T = 16 \div 25$ – предел текучести материала, МПа;

$\psi = 2,1$ – безразмерное напряжение возле угла;

r_n – величина радиуса затекания в верхний угол штампа после n -го деформирования, мм;

H_n – высота образца после n -го деформирования, мм.

Полученные результаты занести в таблицу 2.1.

2.4.7. По данным таблицы построить графики зависимостей $q_э$ и q_T от $D/2r_n$.

$q, \text{МПа}$					
					$D/2r_n$

Рис.2.2 – Схема для построения графиков зависимостей экспериментального и теоретического безразмерных удельных усилий от отношение $D/2r_n$.

2.4.8. Сделать выводы о зависимости величины радиуса затекания металла в угол штампа от удельных усилий деформирования.

2.5. Вопросы для самоконтроля

2.5.1. Что такое безразмерное удельное усилие?

2.5.2. В чем преимущество использования безразмерных удельных усилий перед удельным усилием?

2.5.3. В каком случае удельные усилия выше при обычной или закрытой осадке, если поперечные сечения заготовки в конце деформирования и в том и в другом случае одинаковы?

2.5.4. Указать направление сил трения на торцевых и боковой поверхностях заготовки при закрытой осадке?

2.5.5. Какой угол штампа верхний или нижний заполнится металлом быстрее? Дать объяснение почему

Лабораторная работа № 3

3.1. Тема: «Теоретическое и экспериментальное построение полей линий скольжения».

3.2. Цель работы:

- получить линии скольжения экспериментально, построить линии скольжения теоретически, сравнить их;
- теоретически определить напряжения возникающие во фланце заготовки при вытяжке с прижимом.

3.3. Материальное обеспечение:

- 2.3.1. Универсально-испытательная машина ИП-500;
- 2.3.2. Экспериментальный штамп для вытяжки (см. рис. 3.1.);
- 2.3.3. Образец – плоская круглая заготовка диаметром 100 мм из стали 08КП (ГОСТ 1050-74) толщиной 0,8мм отожжённая в электропечи при температуре $450 \div 480^{\circ}\text{C}$ с выдержкой по времени 1 час;
- 2.3.4. Штангенциркуль, линейка, калька, циркуль.

3.4. Порядок проведения работы

3.4.1. Разработать эскиз экспериментальный штамп для вытяжки (см. рис. 3.1.) и провести эксперимент по получению линий скольжения экспериментально.

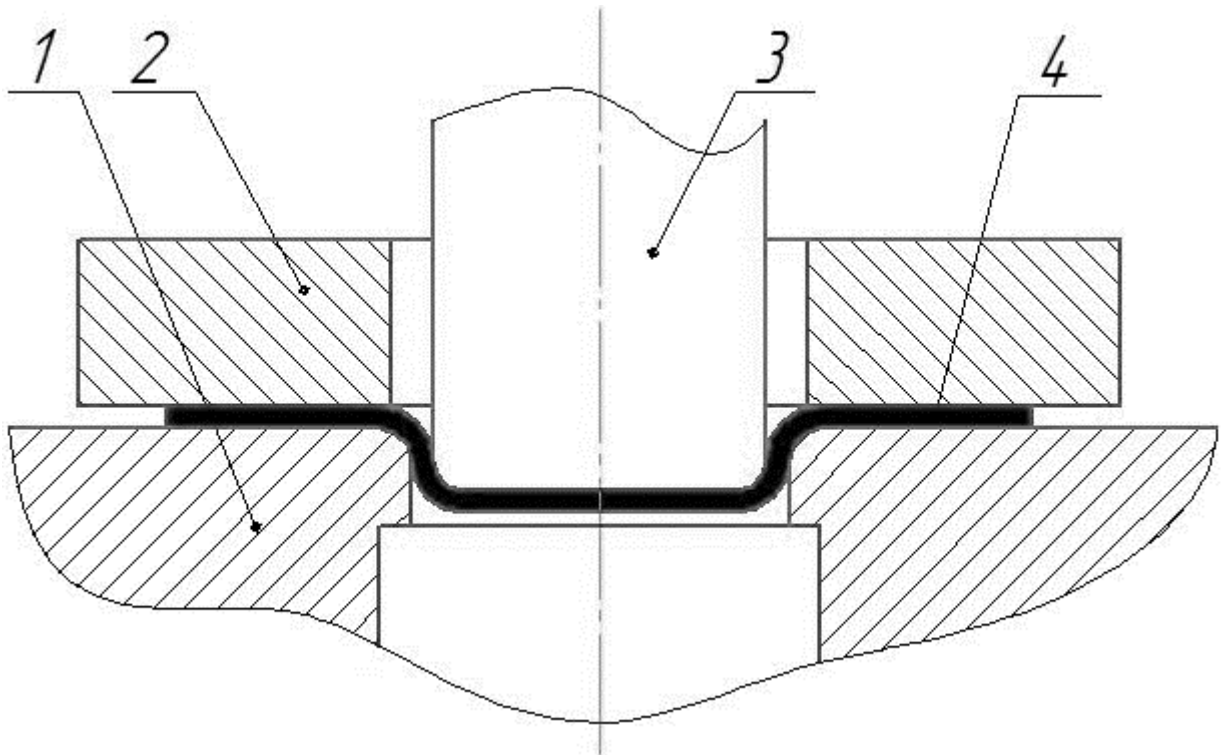


Рис. 3.1. - Схема вытяжки с прижимом: 1 – матрица; 2 – прижим; 3 – пуансон; 4 – заготовка.

3.4.2. Построить линии скольжения теоретически (графически).

3.4.2.1. Для графического построения поля линий скольжения во фланце заготовки при вытяжке с прижимом, координаты узловых точек поля линий скольжения можно определить по формуле:

$$\theta = \ln (\rho/r),$$

θ – угол к горизонтальной оси, соответствующий заданному в табл. 3.1.;

ρ – переменный радиус ($r \leq \rho \leq R$);

r – внутренний радиус кольца (см. рис. 3.2);

R – наружный радиус кольца (см. рис. 3.2).

3.4.2.2. Результаты вычислений координат узловых точек поля линий скольжения занести в табл.3.1.

3.4.2.3. По результатам расчета построить поле линий скольжения (см. рис.3.2.).

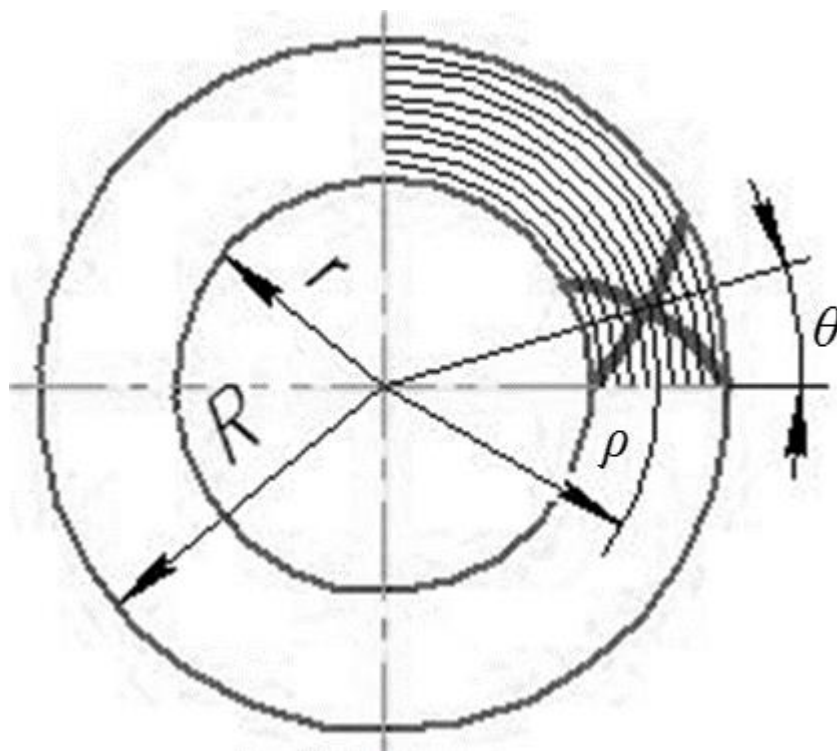


Рис. 3.2. - Схема построения поля линий скольжения.

3.4.2.4. Провести сравнение экспериментального и теоретического полей линий скольжения.

3.4.3. Определить теоретически напряжения возникающие во фланце заготовки при вытяжке с прижимом, т.е. напряжения, действующие в плоском кольце, нагруженном по внутреннему диаметру равномерно распределенной нагрузкой.

3.4.3.1. Для теоретического определения напряжения возникающие во фланце заготовки при вытяжке с прижимом можно использовать следующие формулы:

$$\sigma_{\theta} = -2K \times (1 + \ln(R/\rho)) \quad \text{и} \quad \sigma_{\rho} = 2K \times \ln(R/\rho),$$

где K – постоянная пластичности;

Постоянную пластичности определяем из уравнения:

$$2K = \sigma_T,$$

где σ_T – предел текучести материала, для стали $\sigma_T = 200 \div 300$ МПа

3.4.3.2. Результаты вычислений напряжения в узловых точках поля линий скольжения занести в табл.3.1.

3.4.4. Сделать выводы по работе.

Таблица 3.1. Результаты вычислений

r , мм	30										
R , мм	50										
ρ , мм	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
ρ/r											
$\ln(\rho/r)$											
θ , град											
R/ρ											
$\ln(R/\rho)$											
σ_{θ} , МПа											
σ_{ρ} , МПа											

3.5. Вопросы для самоконтроля

3.5.1. Перечислите методы решения задач в ОМД.

3.5.2. Что позволяет определить метод линий скольжения?

3.5.3. Что называют линией скольжения?

3.5.4. Сколько существует семейств линий скольжения?

3.5.5. Под каким углом линии скольжения выходят на свободную поверхность?

3.5.6. Под какими углами линии скольжения выходят на поверхность с максимальным трением?

3.5.7. Под каким углом семейства линий пересекают друг друга?

3.5.8. Что можно сказать о распространении линии скольжения в пластически деформируемой области?

3.5.9. Назовите примеры деформированного состояния, для которого можно использовать метод линий скольжения.

3.5.10. Где находится область пластической деформации при вытяжке?

Список рекомендуемой литературы

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1977. 423 с.
2. Колмогоров В.Л. Напряжение, деформация, разрушение / В.Л. Колмогоров. М.: Металлургия. 1970. – 229 с.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г.А. Смирнов-Аляев. Л.: Машиностроение. 1978. 368 с.
4. Крауч С. Метод граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. Пер. с. англ. М.: Мир. 1987 - 328 с.
5. Унков Е.П. Инженерная теория пластичности / Е.П. Унков. М.: Машигиз. 1959. 328 с.
6. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. М.: Высшая школа, 1990. 400 с.
7. Безухов Н.И. Основы теории упругости и пластичности / Н.И. Безухов. М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
8. Математическое моделирование предельных состояний твердого тела: учеб. Пособие / Е.А. Ефремова, А.С. Пасхалов, А.В. Гунин. / Донской гос. тех. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. – 88 с.