

Министерство образования и науки Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»

Н.И. НЕСТЕРОВ, В.В. ТЕПЛЯКОВ

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Методические указания по
выполнению лабораторных работ

Санкт-Петербург
2007

Составители *Н.И. Нестеров, В.В. Тепляков*

УДК.: 627.73:539.214(076)

Т431

Т431 **Теория** обработки металлов давлением:
методическое указание по выполнению
лабораторных работ. / Сост.: Н.И. Нестеров, В.В.
Тепляков; Балт. гос. техн. ун-т. СПб, 2007. – 70 с.

Содержат описание лабораторных работ по дисциплине «Теория обработки металлов давлением». Предназначены для студентов, обучающихся по специальностям «Машины и технология обработки металлов давлением».

УДК 627.73:539.214(076)

Рецензент – к-т. техн. наук, О.Л. Киреев

*Утверждено
редакционно-издательским
советом университета*

© БГТУ, 2007

© Н.И. Нестеров, В.В. Тепляков, Составители 2007

ВВЕДЕНИЕ

Программой дисциплины «Теория обработки металлов давлением» лабораторным работам придано важное значение. Лабораторные работы служат не только средством закрепления положений теории и приобретения практических навыков, но и источником выявления новых или уточнения известных закономерностей процессов обработки металлов давлением, поскольку содержат элементы исследования.

Решение поставленных в лабораторных работах учебных и научных задач на должном уровне невозможно без глубокого усвоения положений теории. Поэтому первым пунктом задания по каждой работе предусмотрено изучение теоретического материала по соответствующей теме.

В данном методическом указании включено 4 лабораторных работы первые две работы ставят целью определение функциональной зависимости «интенсивность напряжений - интенсивность деформации» металлов и сплавов по результатам испытания цилиндрических образцов растяжением и сжатием. Необходимость усвоения студентами методики выявления указанной зависимости определена исключительно большим значением ее как в теории обработки металлов давлением, так и в инженерной практике. Эти лабораторные работы каждый студент должен выполнять индивидуально.

Следующие две лабораторные работы посвящены исследованию напряженно-деформированного состояния и силовых параметров процессов обработки металлов давлением.

Для выполнения лабораторных работ предусмотрено деление учебной группы на бригады (подгруппы) по 4 – 5 студентов. Задания по этим работам содержат как индивидуальную, так и общую части. Совокупность результатов выполнения индивидуальных частей заданий составляет единую базу для анализа и формулирования выводов (самостоятельно каждым студентом бригады).

Целесообразно обобщение результатов расчетов и экспериментов всех бригад учебной группы (или нескольких групп), что студенты могут сделать при участии преподавателя на занятии.

Рабочими учебными программами предусмотрено выполнение лабораторных работ как в часы учебных занятий по расписанию, так и вне расписания.

Наибольшие трудности для студентов представляют: анализ результатов расчетов и экспериментов, формулирование выводов, составление отчета. Вызвано это тем, что исполнение названных частей работы невозможно без глубоких знаний по соответствующей дисциплине и высокого уровня общей подготовки исполнителя. Преодолеть указанные трудности использованием консультаций преподавателя, вдумчивым отношением к содержанию и форме изложения методических указаний к лабораторным работам.

Отчет о лабораторной работе необходимо оформить в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001 [1].

Отчет должен быть представлен преподавателю для проверки, после проверки исправлен в соответствии с замечаниями преподавателя и, в случае необходимости, предъявлен для контроля повторно.

С оформленным в соответствии с установленными требованиями отчетом студенту следует явиться к преподавателю на собеседование по содержанию выполненного задания. Принятый отчет необходимо сдать на кафедру.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ "ИНТЕНСИВНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ (σ_i) – ИНТЕНСИВНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ (ε_i) МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ РАСТЯЖЕНИЕМ

1.1. Задачи работы

1. Изучение методики испытания цилиндрических образцов растяжением и методики построения диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ по результатам испытания.
2. Аппроксимация зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ аналитическим выражением $\sigma_i = (\sigma_i)_{пр} - C_0 e^{-\varepsilon_i} - C_1 e^{-N\varepsilon_i}$.
3. Приобретение практических навыков в проведении испытания материалов растяжением и обработке результатов этого испытания.

1.2. Содержание и последовательность выполнения задания

1. Изучить теоретический материал по теме.
2. Измерить размеры образца.
3. Испытать образец растяжением с записью диаграммы "усилие (P) - удлинение (Δl).
4. Измерить размеры образца после испытания.
5. Обработать диаграмму $P - \Delta l$.
6. Вычислить значения координат опорных точек диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$.
7. Вычислить значения координат промежуточных экспериментальных точек диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$.
8. Вычислить значения параметров аппроксимирующей зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$.
9. Вычислить по аппроксимирующей зависимости значения σ_i для заданных величин ε_i .
10. Построить диаграмму $\sigma_i - \varepsilon_i$.
11. Вычислить значения характеристик механических свойств материала ($\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{iy}, \sigma_p, \sigma_{ip}, \varepsilon_{iy}, \varepsilon_{ip}, \psi_y, \psi, \delta$).
12. Составить отчет.

1.3. Процесс растяжения цилиндрического образца

При холодной монотонной пластической деформации металлов и их сплавов между интенсивностью напряжений (σ_i) и интенсивностью деформации (ε_i) существует однозначная функциональная связь, устанавливаемая экспериментально для тех или иных условий деформации (температура деформируемого материала, скорость деформации и др.).

Эта функция характеризует изменение сопротивления деформированию (σ_i) в процессе деформации при неизменных внешних условиях и не зависит от схемы напряженного состояния материала.

Зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ принадлежит весьма важная роль в теории пластичности, в теории и технологии обработки металлов давлением, а также в теории прочности деталей машин, приборов, металлических конструкций. Поскольку функция $\sigma_i - \varepsilon_i$ не зависит от схемы напряженного состояния, ее можно установить по результатам пластического деформирования любым способом, обеспечивающим монотонную деформацию и надежное определение ряда соответственных значений σ_i и ε_i .

В исследованиях и инженерной практике используют в основном три вида испытания: растяжение цилиндрических или плоских (в случае листового материала) образцов, сжатие и кручение цилиндрических образцов. Из указанных видов чаще применяют испытание растяжением цилиндрических образцов, так как при этом деформация происходит без влияния каких-либо посторонних факторов (таких, например, как контактное трение при сжатии) и сравнительно просто вычислить с допустимой погрешностью соответственные значения σ_i и ε_i .

Однако испытание растяжением имеет существенный недостаток: в условиях деформации растягивающими напряжениями пластичность мала.

1.3.1. Основные зависимости

Функциональную зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$ устанавливают по результатам испытания на испытательных машинах, предназначенных для определения стандартных характеристик

механических свойств. В процессе испытания записывают соответствующим механизмом машины диаграмму "усилие (P) - удлинение (Δl).

Деформацию рабочей части цилиндрического образца (рис.1.1) из пластичного материала можно разделить на три характерных этапа.

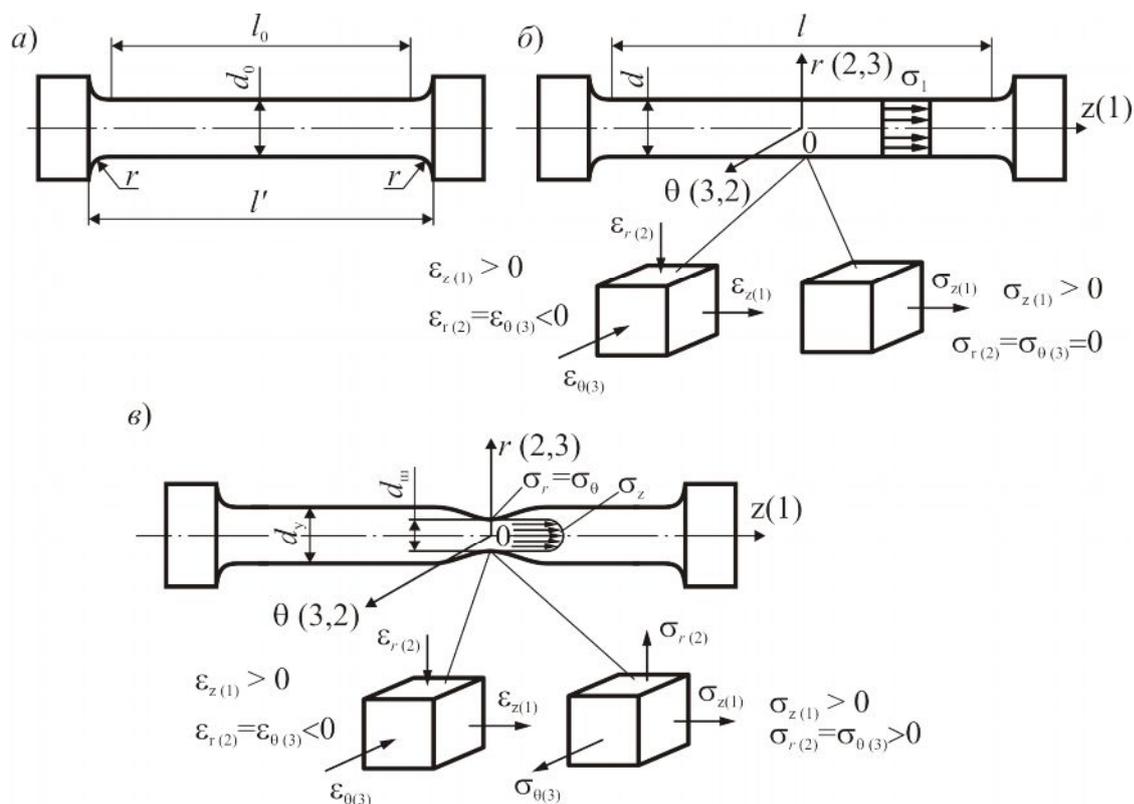


Рис.1.1. Цилиндрический образец: а – до деформации; б, в – на этапах равномерной и сосредоточенной деформации

На первом происходит упругая деформация, которая на диаграмме (рис.1.2) отражена участком OA_1 с линейной зависимостью между нагрузкой и удлинением.

С возникновением пластической деформации наступает второй этап. На диаграмме $P - \Delta l$ переход материала образца из упругого состояния в упругопластическое сопровождается отклонением от линейной зависимости. При этом у большинства материалов усилие непрерывно растет с уменьшающейся интенсивностью (рис.1.2,б), для некоторых материалов (железо, малоуглеродистая сталь, бронза отдельных марок) характерно наличие площадки текучести (рис.1.2,а) - участка с постоянным значением усилия.

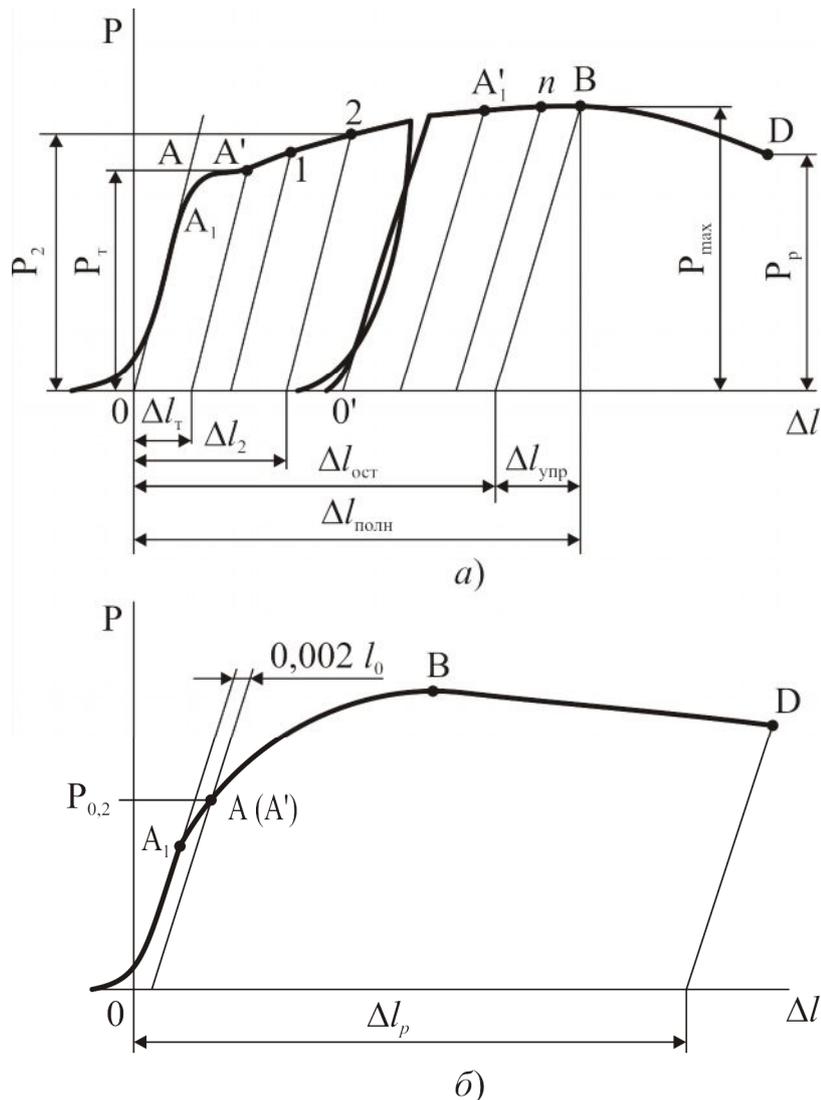


Рис.1.2. Машинная диаграмма $P - \Delta l$ с площадкой текучести (а) и без нее (б)

На втором этапе деформация происходит равномерно во всем объеме рабочей части образца с сохранением его цилиндрической формы. Схемы деформированного и напряженного состояний (рис.1.1, б) во всех точках одинаковы и неизменны во времени.

Главные оси деформации и напряжений (1, 2, 3) во всем объеме совпадают с осями координат (θ, r, z), вид напряженно-деформированного состояния соответствует простому растяжению, деформация однородная и монотонная. Отмеченные положения определяют следующие, весьма простые и математически строгие зависимости для расчета значений σ_i и ε_i (без учета упругой составляющей деформации) в любой стадии второго этапа деформации:

$$\sigma_i = \sigma_1 = \frac{P}{F} = \frac{4P}{\pi d^2}, \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_1 \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln \frac{F_0}{F} = 2 \ln \frac{d_0}{d}, \quad (1.2)$$

где d_0 , l_0 , F_0 - диаметр, длина и площадь поперечного сечения рабочей части образца до деформации (рис. 1.1,а);

d , F - диаметр и площадь поперечного сечения деформированного образца в текущей стадии.

Поскольку пластическая деформация происходит без изменения объема, формулу (1.1) можно записать иначе:

$$\sigma_i = \frac{P(l_0 + \Delta l)}{F_0 l_0}.$$

Из формул (1.1а) и (1.2) следует, что для расчета значений σ_i и ε_i на втором этапе деформации необходимо знать, кроме диаметра и длины рабочей части образца до деформации, соответственные величины P и Δl , которые можно определить по машинной диаграмме $P - \Delta l$.

Значение σ_i в момент начала второго этапа деформации называют пределом текучести. Согласно [2], в случае отсутствия на диаграмме $P - \Delta l$ площадки текучести определяют условный предел текучести - напряжение (интенсивность напряжений), соответствующее заданной остаточной деформации. Как правило, величину деформации назначают равной 0,2% длины рабочей части образца, при этом предел текучести обозначают $\sigma_{0,2}$ и вычисляют по формуле:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad (1.3)$$

где $P_{0,2}$ - нагрузка при удлинении образца, равном 0,2% (рис. 1.2,б).

Если на диаграмме $P - \Delta l$ есть площадка текучести, определяют так называемый физический предел текучести (σ_T)

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (1.4)$$

где P_T - нагрузка, соответствующая площадке текучести (рис. 1.2,а).

Этап равномерной пластической деформации материалов

имеет, как правило, относительно небольшую протяженность по величине деформации. На некоторой стадии растяжения происходит сосредоточение деформации (образование шейки) в каком-либо одном месте рабочей части образца, в остальном объеме пластическая деформация прекращается. На диаграмме $P - \Delta l$ началу образования шейки соответствует точка B (рис. 1.2), после которой усилие уменьшается.

Деформацию на втором этапе часто называют устойчивой, имея в виду сохранение (устойчивость) цилиндрической формы образца, а величину ε_i в момент начала образования шейки - предельно устойчивой деформацией и обозначают ε_{iy} . Для расчета ε_{iy} и соответствующего этой деформации значения интенсивности напряжений σ_{iy} действительны формулы (1.1), (1.2), (1.1a), которые с учетом дополнительных обозначений получают следующий вид:

$$\sigma_{iy} = \frac{P_{\max}}{F_y} \stackrel{=}{=} \frac{4P_{\max}}{\pi d_y^2} \stackrel{=}{=} \frac{P_{\max} (l_0 + \Delta l)}{F_0 l_0},$$

$$\varepsilon_{iy} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \stackrel{=}{=} \ln \frac{F_0}{F_y} \stackrel{=}{=} 2 \ln \frac{d_0}{d_y},$$

где P_{\max} - наибольшее значение усилия на диаграмме $P - \Delta l$ (рис. 1.2).

Третий этап деформации наступает с момента начала образования шейки (этап сосредоточенной деформации), при этом объем металла, участвующего в пластической деформации, непрерывно уменьшается. Несмотря на изменение формы образца, в зоне наименьшего поперечного сечения шейки деформация остается равномерной и монотонной, схема деформации, направления главных осей и соотношения компонентов (рис.1.1,в) те же, что и на втором этапе. Однако схема напряженного состояния из линейной (на втором этапе) переходит в объемную (рис. 1.1,в), за исключением поверхности, где по-прежнему $\sigma_r = \sigma_\theta = 0$.

Вследствие равномерности деформации по поперечному сечению образца значение ε_i в каждый момент третьего этапа в любом сечении шейки может быть вычислено по изменению диаметра образца с использованием формулы (1.2), которая для

наименьшего сечения имеет вид

$$\varepsilon_i = \ln \frac{F_0}{F_{\text{ш}}} = 2 \ln \frac{d_0}{d_{\text{ш}}},$$

где $d_{\text{ш}}$, $F_{\text{ш}}$ - диаметр и площадь наименьшего поперечного сечения шейки образца.

Для расчета значения σ_i в зоне наименьшего поперечного сечения применяют следующее выражение [2, 3]:

$$\sigma_i = \eta \frac{P}{F_{\text{ш}}}, \quad (1.5)$$

где η - коэффициент, отражающий влияние радиального и тангенциального компонентов напряжений. Величина η меньше единицы и тем в большей мере отличается от единицы, чем больше разница между d_y и $d_{\text{ш}}$. На рис.1.3 показан график изменения η от $\ln F_y/F_{\text{ш}}$, который можно использовать в расчетах. Поскольку в процессе растяжения при уменьшении $d_{\text{ш}}$ отношение $F_y/F_{\text{ш}}$ растет, значение η непрерывно падает.

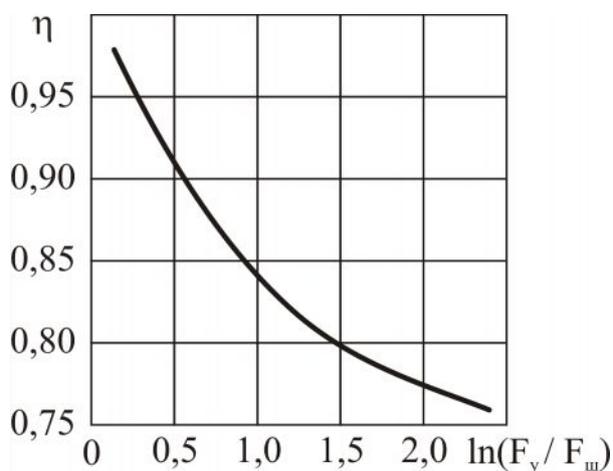


Рис.1.3. Зависимость η от $\ln(F_y/F_{\text{ш}})$

При некотором значении деформации происходит разрушение (разрыв) в зоне наименьшего сечения шейки образца. На диаграмме $P - \Delta l$ (рис. 1.2) момент разрушения обозначен точкой D . Значение ε_i в наименьшем сечении шейки образца непосредственно перед

разрушением называют предельной деформацией при растяжении и обозначают ε_{ip} , тот же индекс придают соответствующей величине σ_{ip} .

Для расчета значений ε_i и σ_i на третьем этапе деформации образца необходимо знать текущие соответственные величины P и $d_{\text{ш}}$. При наличии технической возможности диаметр $d_{\text{ш}}$ целесообразно измерить в процессе растяжения. Если это сделать нельзя, для измерения следует прерывать деформацию (с

извлечением образца из захватов) на нескольких стадиях между точками B и D диаграммы $P - \Delta l$. Как показали исследования, зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$ на участке BD близка к линейной. Поэтому в большинстве случаев промежуточные точки на участке можно не определять, полагая σ_i линейной функцией ε_i .

Характер функциональной связи $\sigma_i - \varepsilon_i$, присущей большинству пластичных материалов, изображен на рис. 1.4.

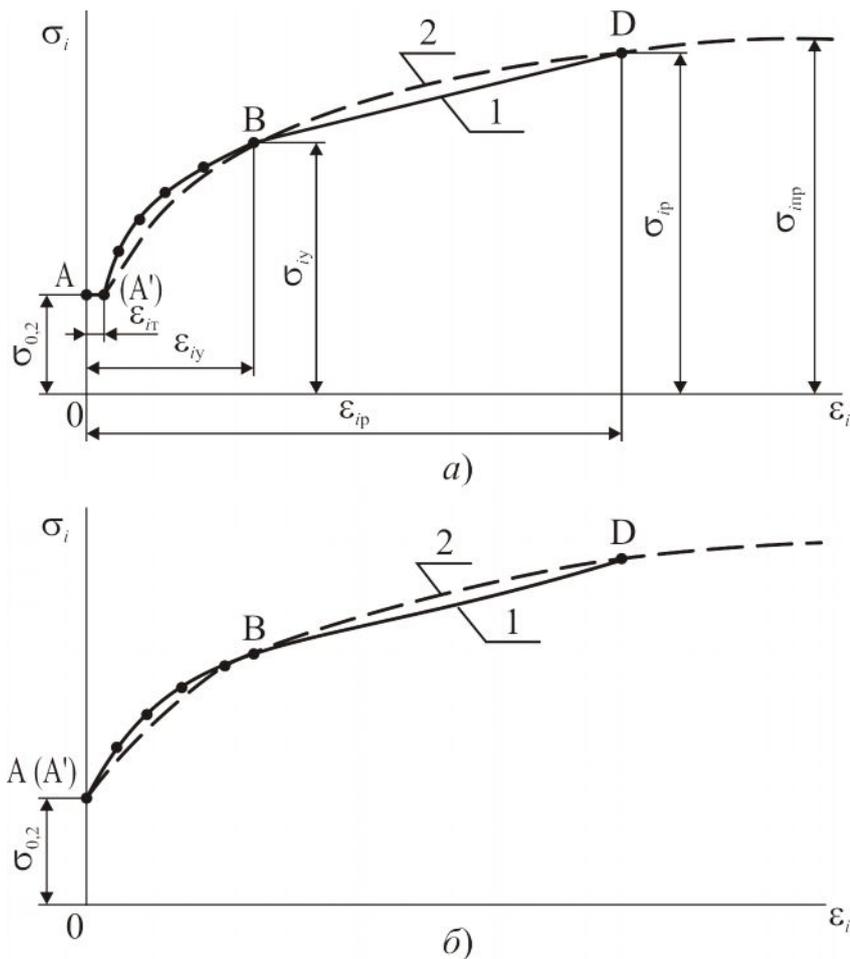


Рис.1.4. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ при наличии площадки текучести (а) и без нее (б), построенные по экспериментальным точкам (1) и по аппроксимирующей функции (2)

1.4. Аппроксимация зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$

Для математического описания процесса пластической деформации, технологических и прочностных расчетов, особенно с применением ЭВМ, необходимо иметь аналитическое выражение функциональной связи $\sigma_i - \varepsilon_i$.

Задача аппроксимации зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ оказалась весьма

сложной, ее решали многие крупнейшие отечественные и зарубежные специалисты, однако до настоящего времени не найдено решение, в полной мере удовлетворяющее основным требованиям.

Из большого числа функций, предложенных в качестве аппроксимирующих зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$, можно выделить как наиболее удачные две [3, 4]:

$$\sigma_i = a\varepsilon_i^b, \quad (1.6)$$

$$\sigma_i = (\sigma_i)_{\text{пр}} - Ce^{-\varepsilon_i} - C_1e^{-N\varepsilon_i}, \quad (1.7)$$

где $(\sigma_i)_{\text{пр}}$ - предельное значение σ_i , определяемое свойствами деформируемого материала; a, b, C, C_1, N - постоянные, зависящие от химического состава материала, его состояния и условий испытания ; e - основание натурального логарифма. Формула (1.7) предложена В.М.Розенберг. Функции (1.6), (1.7) не охватывают участка, соответствующего площадке текучести на диаграмме $P - \Delta l$).

Одним из частных выражений степенной зависимости (1.6)

служит уравнение
$$\sigma_i = \sigma_{iy} \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iy}} \right)^{\varepsilon_{iy}}.$$

Применительно к испытанию растяжением цилиндрического образца выражение (1.7) можно записать в иной форме:

$$\sigma_i = (\sigma_i)_{\text{пр}} - C \left(\frac{F}{F_0} \right) - C_1 \left(\frac{F}{F_0} \right)^N. \quad (1.7a)$$

Зависимость (1.7) имеет существенные преимущества перед другими. Рассмотрим ее подробнее. Поскольку выражение (1.7) представляет собой эмпирическую формулу, ее параметры $(\sigma_i)_{\text{пр}}, C, C_1, N$ необходимо рассчитать. В.М.Розенберг предложила следующий простой и достаточно надежный способ определения значений указанных параметров. Показатель N должен быть задан и в случае необходимости в дальнейшем уточнен. (Ориентировочно значения можно принимать равными от 10 до 30). Для расчета остальных параметров следует в формулу (1.7) или (1.7a) подставить последовательно три совокупности величин σ_i, ε_i или $\sigma_i, F/F_0$ и решить полученную систему трех уравнений относительно $C, C_1, (\sigma_i)_{\text{пр}}$. В качестве указанных

значений σ_i, ε_i ($\sigma_i, F/F_0$) удобно принять соответствующие так называемым опорным точкам диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i - A', B, D$ (рис. 1.4). (Точки A' и B можно заменить другими, расположенными вблизи указанных в интервале AB). В точке D последнее слагаемое уравнения (1.7) или (1.7а) близко к нулю. В результате имеем систему трех уравнений:

$$\begin{aligned}\sigma_{iA'} &= (\sigma_i)_{\text{пр}} - Ce^{-\varepsilon_{iA'}} - C_1 e^{-N\varepsilon_{iA'}}, \\ \sigma_{iB} &= (\sigma_i)_{\text{пр}} - Ce^{-\varepsilon_{iB}} - C_1 e^{-N\varepsilon_{iB}}, \\ \sigma_{iD} &= (\sigma_i)_{\text{пр}} - Ce^{-\varepsilon_{iD}} - C_1 e^{-N\varepsilon_{iD}},\end{aligned}$$

из решения которой следует:

$$\begin{aligned}C &= \frac{\sigma_{iD} - \sigma_{iB} - (\sigma_{iD} - \sigma_{iA'}) e^{(\varepsilon_{iA'} - \varepsilon_{iB})N}}{e^{-\varepsilon_{iB}} - e^{-\varepsilon_{iD}} - (e^{-\varepsilon_{iA'}} - e^{-\varepsilon_{iD}}) e^{(\varepsilon_{iA'} - \varepsilon_{iB})N}}, \\ (\sigma_i)_{\text{пр}} &= \sigma_{iD} + Ce^{-\varepsilon_{iD}}, \\ C_1 &= \left((\sigma_i)_{\text{пр}} - Ce^{-\varepsilon_{iA'}} - \sigma_{iA'} \right) e^{N\varepsilon_{iA'}},\end{aligned}\quad (1.8)$$

где индексы A', B, D указывают на принадлежность к точкам A', B, D диаграммы $P - \Delta l$.

1.5. Характеристики механических свойств материала, определяемые по результатам испытания растяжением

ГОСТ 1497-84 устанавливает следующие характеристики механических свойств пластически деформируемого материала: $\sigma_{T(0,2)}$ - предел текучести, σ_B - временное сопротивление (предел прочности), δ - относительное удлинение, ψ - относительное сужение. Значения σ_B, δ и ψ вычисляют по формулам:

$$\sigma_B = \frac{P_{\text{max}}}{F_0}, \quad \delta = \frac{\Delta l_p}{l_0}, \quad \psi = \frac{F_0 - F_{\text{ш}}}{F_0},\quad (1.9)$$

где Δl_p - удлинение образца к моменту разрушения (рис. 1.2); $F_{\text{ш}}$ - площадь наименьшего поперечного сечения шейки образца в момент, предшествующий разрушению.

Предел текучести и временное сопротивление согласно ГОСТ 1497-84 должны характеризовать сопротивление материала пластическому деформированию, а относительное

удлинение и относительное сужение - его пластичность. Предел текучести как характеристика сопротивления пластическому деформированию в состоянии перехода материала из упругой деформации в упругопластическую вполне соответствует своему назначению. Временное сопротивление представляет собой условную величину, поскольку определено как отношение P_{\max} не к действительной площади F_y , а к начальной F_0 , и потому не может быть использовано в качестве характеристики сопротивления пластическому деформированию.

Условной величиной является и относительное удлинение δ , так как Δl_p включает в себя как удлинение на этапе равномерной деформации образца, так и приращение длины на этапе сосредоточенной деформации. Таким образом, составляющая общего удлинения, вызванная деформацией лишь небольшого участка, отнесена к длине всей расчетной части образца, что делает результат испытания непригодным для применения при математическом описании процесса и в расчетах. Кроме того, при конечной деформации не приемлем рекомендованный ГОСТ способ ее выражения в виде отношения удлинения к длине рабочей части.

Относительное сужение правильно характеризует пластическую деформацию в зоне шейки образца, хотя для ее выражения использован иной способ, чем в теории пластичности. Однако от ψ легко перейти к ε_{ip} , так как между ними существует функциональная связь: $\varepsilon_{ip} = \ln 1/(1 - \psi)$.

Помимо указанных, стандартом предусмотрена еще одна характеристика, названная "истинным сопротивлением разрыву" σ_p и равная отношению P_p и $F_{ш}$. "Истинное сопротивление разрыву" представляет собой по смыслу то же, что и σ_{ip} , но вычислено без учета изменения схемы напряженного состояния, вызванного образованием шейки.

Следовательно, из трех стандартных характеристик (предел текучести, временное сопротивление, «истинное сопротивление разрыву») выражает с достаточной достоверностью сопротивление деформированию лишь предел текучести, который, как отмечено выше, является значением σ_i в начальной стадии пластической деформации. По мере увеличения ε_i сопротивление деформированию (σ_i) непрерывно растет с

переменной интенсивностью (рис.1.4), поэтому его нельзя выразить частными значениями. В качестве характеристики сопротивления металлов и их сплавов пластическому деформированию должна быть использована функциональная зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$, заданная аналитическим выражением или графиком. В этой зависимости σ_i можно считать текущим (переменным) предел текучести.

Из множества значений σ_i целесообразно выделить некоторые частные, которыми следует считать $\sigma_{T(0,2)}$, σ_{iy} , σ_{ip} , а также $(\sigma_i)_{пр}$.

В отличие от сопротивления, пластичность при растяжении достаточно характеризовать одним значением ε_i , которым служит ε_{ip} (ψ). В некоторых случаях может оказаться полезным значение ε_{iy} (ψ_y), которое следует выделить как характеристику механических свойств.

1.6. Выполнение эксперимента и обработка его результатов

Экспериментальную часть работы каждый студент выполняет в лаборатории кафедры при участии лаборанта. Перед проведением эксперимента следует ознакомиться с испытательной машиной, приспособлением для растяжения образца (реверсором), измерительным инструментом, а также получить инструктаж по технике безопасности у преподавателя или лаборанта и расписаться в журнале.

Для испытания каждый студент получает один цилиндрический образец. (В связи с неоднородностью материала, так как неизбежны различия по химическому составу и структуре, в практике испытаний используют не менее трех образцов, изготовленных из одного материала. Поскольку лабораторная работа имеет учебный характер, для сокращения затрат материала и времени заданием предусмотрено испытание лишь одного образца.) До деформации необходимо измерить размеры d_0 , l и r (рис.1.1а), а после испытания - d_y и $d_{ш}$ (рис.1.1,в). Для получения достоверных результатов следует испытывать образец, у которого разность наибольшего и наименьшего значений диаметра цилиндрической части не превышает 0,01 мм. Поэтому диаметр d_0 должен быть измерен в

трех сечениях, расположенных в середине и вблизи границ цилиндрической части, в каждом из них в трех направлениях, составляющих между собой угол, равный приблизительно 120° . Необходимую точность измерения можно получить, используя микрометр или инструментальный микроскоп. Вид измерительного инструмента устанавливает студент самостоятельно, руководствуясь требованиями, определяемыми задачами работы. Диаметры d_y и $d_{ш}$ следует измерить так же тщательно, как и d_0 . Если части образца после его разрушения не равны, для измерения d_y необходимо использовать большую из них. Диаметр d_y достаточно измерить в одном сечении (в трех направлениях), равноудаленном от места разрушения и головки.

Длину l и радиус r можно измерить с относительно невысокой точностью соответственно штангенциркулем и радиусомером.

Результаты измерений должны быть оформлены в виде таблицы (табл.1.1), включающей и некоторые расчетные параметры.

Таблица 1.1

Размеры (мм) образца до и после деформации, площади (мм^2) поперечных сечений

Направление измерения	d_0			d_y	$d_{ш}$	r	l	$l_0 = l - 2r$
	Номер сечения							
	1	2	3					
1								
2								
3								
Среднее значение								
$F_o =$	$F_y =$			$F_{ш} =$				

В отчете следует указать использованный инструмент и погрешность измерения.

Испытания студенты должны проводить самостоятельно, получив у лаборанта подробные указания. До начала нагружения образца необходимо подготовить к работе устройство для записи

диаграммы $P - \Delta l$, отметить на бумаге нулевую линию. С целью уточнения участка диаграммы, соответствующего упругой деформации, в процессе испытания целесообразно сделать полную разгрузку на этапе равномерной деформации и, не извлекая образец из реверсора, снова нагружать его, доводя до разрушения. Линию упругой деформации повторного нагружения можно считать более достоверной. Записанную машинную диаграмму $P - \Delta l$ следует обработать: нанести координатные оси, обозначить масштабы записи усилия и удлинения, обозначить расчетные точки и определить значения P и Δl этих точек. Количество (n) промежуточных точек на участке равномерной деформации должно быть назначено в зависимости от протяженности участка AB диаграммы $P - \Delta l$ (назначается преподавателем).

Для исключения упругой составляющей деформации через каждую из выбранных точек необходимо провести линию (рис.1.2), параллельную линии, характеризующей упругую деформацию на начальном участке диаграммы (OA_1) или после разгрузки ($O'A_1'$). Результаты обработки машинной диаграммы должны быть представлены в виде табл.1.2.

Для расчета соответственных значений σ_i, ε_i выбранных точек диаграммы и параметров аппроксимирующей зависимости связи $\sigma_i - \varepsilon_i$ на кафедре имеется программа для расчета на ПЭВМ. По этой программе рассчитываются коэффициенты аппроксимирующей зависимости $(\sigma_i)_{пр}$, C , C_1 , значения σ_i в точках, указанных в табл. 1.2, и их отклонения от значений, полученных по результатам эксперимента. Варьированием коэффициента N необходимо достигнуть погрешности расчета по аппроксимирующей функции относительно экспериментальных значений σ_i на участке AB диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ в 2%. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.3. Студент имеет возможность провести все расчеты как самостоятельно, так и по программе, имеющейся на кафедре.

Результаты расчета следует приложить к отчету и представить в виде графика функциональной зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ (рис.1.4).

Таблица 1.2

Результаты обработки машинной диаграммы

Координата диаграммы	Расчетная точка								
	<i>A</i>	<i>A'</i>	1	2	3	...	<i>n</i>	<i>B</i>	<i>D</i>
<i>P</i> , кг									
Δl , мм									

Таблица 1.3

Исходные данные для расчета на ЭВМ

d_0	l_0	d_y	$d_{ш}$	η	P_p	P_T	Δl_T	P_1	Δl_1	...	P_n	Δl_n	P_{max}	N

Для сравнительной оценки используемых в научных исследованиях инженерной практике характеристик механических свойств материалов должны быть вычислены также значения ψ_y, ψ, δ .

Все характеристики механических свойств следует представить в табл.1.4.

Таблица 1.4

Значения механических свойств

σ_T	σ_B	σ_{iy}	σ_p	σ_{ip}	δ	ψ_y	ψ	ε_{iy}	ε_{ip}
кг/мм ² (x9,8 МПа)									

Заключительный этап работы состоит в анализе установленной зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ (характер и величина изменения σ_i по мере увеличения деформации, соотношения значений равномерной, сосредоточенной и предельной деформации), а также в оценке качества аппроксимирующей формулы. Итогом анализа должны быть выводы по результатам работы в соответствии с ее задачами.

1.7. Оборудование, приборы, инструмент, образцы, материалы, необходимые для выполнения задания

1. Испытательная машина ИМ-4А.
2. Реверсор.
3. Шестигранные цилиндрические образцы из металлов и сплавов разных марок.
4. Микрометр, штангенциркуль, радиусомер.
5. Инструментальный измерительный микроскоп.
6. Бумага - миллиметровка.

1.8. Указания по составлению отчета

Отчет о работе должен содержать: задачи работы, условия и результаты эксперимента, техническую характеристику испытательной машины, исходные данные и результаты расчета механических свойств материала, исходные данные и результаты определения и аппроксимации зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$, анализ зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$.

Диаграмму $P - \Delta l$ необходимо включить в отчет в качестве приложения, диаграмму зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$, построенную на миллиметровке по экспериментальным точкам и по аппроксимирующей формуле, можно поместить в отчет в качестве рисунка или приложения.

При оформлении отчета следует руководствоваться указаниями, изложенными в приложении.

1.9. Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды испытаний применяют для определения функциональной зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$? Каковы достоинства и недостатки испытания растяжением?

2. Из каких этапов состоит деформация цилиндрического образца при испытании растяжением? Каковы схемы напряженного и деформированного состояний в зоне пластической деформации на этих этапах?

3. Какой вид имеет диаграмма $P - \Delta l$? Как она отражает переход от одного этапа деформации к другому?

4. Какой вид имеет диаграмма $\sigma_i - \varepsilon_i$? Какие свойства

испытанного материала она отражает? Что характеризуют ее опорные точки?

5. Каково применение зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ в теории и в инженерной практике?

6. Какие характеристики механических свойств устанавливают по результатам испытания растяжением? Какие характеристики предусмотрены ГОСТ 1497-84 и можно ли их использовать в математическом описании процесса пластической деформации?

7. Почему нельзя распространить способ определения значений σ_i и ε_i в промежуточных точках участка AB на участок BD с помощью диаграммы $P - \Delta l$?

8. Что называют предельной деформацией при растяжении?

9. Что учитывает коэффициент η в формуле для расчета σ_{ip} ?

10. Каков физический смысл интенсивности напряжений σ_i в функциональной зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$?

11. По каким формулам вычислены значения σ_i и ε_i в опорных и в промежуточных точках диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$? Как установлены эти формулы?

12. Какой вид аппроксимирующей функции зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ использован в лабораторной работе? Как определены значения параметров? Какие другие функции применяют в качестве аппроксимирующих?

13. Могут ли быть разными значения характеристик механических свойств материала одной марки?

14. Почему относительное удлинение, предусмотренное ГОСТ 1497-84 в качестве характеристики пластичности, не может быть использовано как мера пластической деформации?



Рис.1.5. Испытательная машина ИМ-4А



Рис.1.6. Приспособление для растяжения

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ «ИНТЕНСИВНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ (σ_i) – ИНТЕНСИВНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ (ε_i)» МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ СЖАТИЕМ

2.1. Задачи работы

1. Изучение методики испытания цилиндрических образцов сжатием для построения диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$.
2. Приобретение практических навыков в проведении испытания материалов сжатием и обработке результатов этого испытания.

2.2. Содержание и последовательность выполнения задания

1. Изучить теоретический материал по теме.
2. Измерить размеры образцов.

3. Испытать образец осаживанием с записью диаграммы «усилие (P) - удлинение (Δh)».

4. Измерить размеры образцов после испытания.

5. По диаграмме $P - \Delta h$ осаживания высокого образца определить величину усилия осаживания для назначенного количества стадий процесса осаживания.

6. Вычислить расчетные значения величин осаживания Δh низкого образца для назначенного количества стадий процесса осаживания, по диаграмме $P - \Delta h$ осаживания высокого образца определить величину усилия осаживания .

7. Определить значения коэффициента k , учитывающего влияние трения на торцах образца.

8. Вычислить величину усилия осаживания высокого образца для назначенных стадий процесса при условии отсутствия трения.

9. Вычислить значения интенсивности напряжений σ_i и интенсивности деформации ε_i .

10. Построить диаграмму $\sigma_i - \varepsilon_i$.

11. Составить отчет.

2.3. Методики построения диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$

Как было указано в п.1, функциональная зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$ характеризует изменение сопротивления деформированию (σ_i) в процессе деформации при неизменных внешних условиях и не зависит от схемы напряженного состояния материала.

При схеме напряженного состояния с растягивающими напряжениями металл обладает малыми пластическими свойствами, поэтому по испытаниям на растяжение можно получить зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$ только для относительно небольших степеней деформаций, обычно значительно меньших, чем в операциях обработки давлением. Поэтому исследователями в области обработки металлов давлением было предложено несколько методов построения диаграмм $\sigma_i - \varepsilon_i$ по результатам испытаний на сжатие [5, 6].

2.3.1. Испытание цилиндрических образцов на сжатие в соответствии с ГОСТ 25.503-97 [5]

Для построения зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ испытывают серию одинаковых цилиндрических образцов (см. рис.2.1) на нескольких уровнях заданных нагрузок. Образцы могут иметь торцевые выточки (рис.2.1,б).

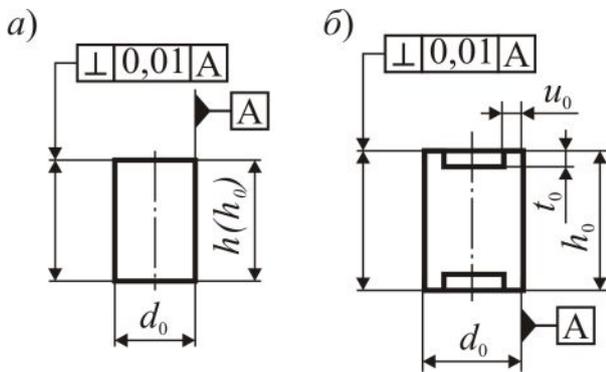


Рис.2.1. Цилиндрический образец для испытания на сжатие

Интенсивность напряжений рассчитывают по формуле $\sigma_i = P/F$, где P - осевое сжимающее усилие, F - площадь поперечного

сечения образца.

Логарифмическую деформацию (укорочение) ε_i , рассчитывают по формулам:

- для образцов первого типа (рис.2.1,а): $\varepsilon_i = \ln(h_0/h)$,
- для образцов второго типа (рис.2.1,б): $\varepsilon_i = \ln(F/F_0)$,

где h_0, F_0, h, F - высота и площадь поперечного сечения образца до и в текущей стадии деформирования.

Нагружают образец до заданного усилия. Разгружают образец и измеряют диаметр образца d в двух взаимно перпендикулярных направлениях, высоту образца h . Диаметр d для образцов второго типа измеряют посередине осаженого образца (на расстоянии 0,5 от торцов).

Для определения диаметра d образцов первого типа измеряют диаметры осаженных образцов на обоих торцах в двух взаимно перпендикулярных направлениях и устанавливают среднее арифметическое значение диаметра торцов d_T , а посередине образца измеряют максимальное значение диаметра осаженой заготовки d_{max} , диаметр образца после осаживания рассчитывают по формуле:

$$d = (d_T - d_{max})/2.$$

Для образцов с торцевыми выточками одноразовое испытание проводят до момента исчезновения буртиков. С целью достижения более высоких степеней равномерной деформации применяют двухступенчатую осадку, при этом значение логарифмической деформации между осадками должно быть не менее 0,45. При двухступенчатом испытании проводят после первого осаживания перетачивание образцов для образования цилиндрической выточки.

Для образцов первого типа также допускается применять промежуточное перетачивание для двухступенчатого осаживания, при этом логарифмическая степень деформации между ступенями должна быть не менее 0,45.

Количество испытываемых образцов должно быть не менее 12 и может достигать до 20 и более. Допускается при ограниченном объеме испытаний уменьшать количество образцов до пяти с последующим регрессионным анализом результатов испытаний.

Образцы изготавливают максимально возможной высоты h_0 , обеспечивающей продольную устойчивость образца ($h_0 = (3 \dots 5)d_0$). Для образцов с торцевыми выточками допускается $h_0/d_0 = 1$. Для переточенных образцов отношение высоты к диаметру должно быть равным единице.

2.3.2. Испытание цилиндрических образцов на сжатие по методике Г.А.Смирнова-Аляева [6]

При испытаниях на сжатие необходимо исключить влияние контактного трения, что представляет довольно сложную задачу. Г.А.Смирнов-Аляев [6] предложил косвенный метод исключения влияния трения.

Испытанию подвергают два цилиндрических образца одинакового диаметра ($d_{01} = d_{02}$), высота второго образца в два раза меньше высоты первого ($h_{02} = 0,5h_{01}$). Первый образец осаживают до высоты h_1 , второй - до высоты $h_2 = h_{02} \frac{h_1}{h_{01}}$ с

приложением усилия P_1 и P_2 соответственно. Усилие, необходимое для осаживания первого образца до высоты $h = h_1$ при отсутствии сил трения на торцах, обозначают P .

Поскольку $\varepsilon_1 = \ln \frac{h_1}{h_{01}} = \ln \frac{h_2}{h_{02}} = \varepsilon_2$, то интенсивности

деформации обоих образцов одинаковы, также одинаковы и значения интенсивности напряжений σ_i .

С учетом предложенной Е.П.Унксовым формулы, учитывающей влияние трения через коэффициент подпора, определяемого по формуле

$$k = f\left(\frac{\mu d}{h}\right) 2\left(\frac{h}{\mu d}\right)^2 \left(e^{\frac{\mu d}{h}} - 1 - \frac{\mu d}{h}\right),$$

усилия осаживания определяют по формулам:

$$P_1 = f(\theta_1) \sigma_i \frac{\pi}{4} d_1^2 \text{ и } P_2 = f(\theta_2) \sigma_i \frac{\pi}{4} d_2^2,$$

где $\theta_1 = \frac{\mu d_1}{h_1}$, $\theta_2 = \frac{\mu d_2}{h_2}$.

При отсутствии трения усилие осаживания первого образца P можно определить по формуле: $P = \sigma_i \frac{\pi}{4} d^2$, а фактически имеем $P_1 = kP$, где $k = f(\theta_1)$.

С использованием условия сохранения объема Г.А.Смирновым-Аляевым получена зависимость $k = \varphi(C, k_1)$ в виде табл. 2.1, используя которую, можно исключить фактор трения при обработке результатов испытания на осаживание двух образцов (Диаметры образцов должны быть приблизительно равны, а высоты отличаться приблизительно в два раза).

Параметр C зависит от соотношения размеров образцов:

$$C = \frac{d_{02} h_{01}}{d_{01} h_{02}}. \quad (2.1)$$

Из диаграммы « $P - \Delta h$ » для первого образца определяют совокупность значений $(P_{1i}, \Delta h_{1i})$. Для обработки диаграммы

« $P - \Delta h$ » осаживания второго, более низкого, образца определяют координаты расчетных точек:

$$\Delta h_{2i} = \Delta h_{1i} \frac{h_{02}}{h_{01}}. \quad (2.2)$$

По расчетным значениям Δh_{2i} определяют соответствующие значения P_{2i} . Далее рассчитывают ряд значений величины k_{1i} :

$$k_{1i} = \frac{P_{2i}}{P_{1i}} \left(\frac{d_{01}}{d_{02}} \right)^2. \quad (2.3)$$

По таблице 2.1 находят ряд значений k_i и рассчитывают ряд значений усилия осаживания первого, более высокого образца без учета влияния сил трения:

$$P_i = \frac{P_{1i}}{k_i}. \quad (2.4)$$

В условиях напряженного состояния простого сжатия ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$) интенсивность напряжений σ_i и интенсивность деформации ε_i равны:

$$\sigma_i = -\sigma_3 = \frac{P}{F_0} \left(\frac{h_0 - \Delta h}{h_0} \right), \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_i = \ln \frac{h_0}{h_0 - \Delta h}. \quad (2.6)$$

Используя зависимости (2.1) и (2.2), определяют ряд соответственных значений ε_i и σ_i и строят зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$.

Таблица 2.1

Значения коэффициента пропорциональности k

k_i	Значения параметра C								
	1,92	1,93	1,94	1,95	1,96	1,97	1,98	1,99	2,00
1,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
1,01	1,0108	1,0107	1,0106	1,0104	1,0103	1,0102	1,0101	1,0100	1,0099
1,02	1,0216	1,0213	1,0211	1,0206	1,0203	1,0201	1,0199	1,0197	1,0195
1,03	1,0322	1,0318	1,0315	1,0311	1,0308	1,0304	1,0301	1,0298	1,0295
1,04	1,0427	1,0422	1,0418	1,0413	1,0409	1,0404	1,0400	1,0396	1,0392
1,05	1,0531	1,0525	1,0520	1,0514	1,0509	1,0503	1,0498	1,0493	1,0488
1,06	1,0634	1,0626	1,0621	1,0614	1,0608	1,0601	1,0595	1,0589	1,0583
1,07	1,0737	1,0729	1,0721	1,0713	1,0706	1,0698	1,0691	1,0684	1,0677
1,08	1,0839	1,0830	1,0821	1,0812	1,0803	1,0794	1,0786	1,0778	1,0770
1,09	1,0940	1,0930	1,0920	1,0910	1,0900	1,0890	1,0881	1,0872	1,0863
1,10	1,1040	1,1029	1,1018	1,1007	1,0996	1,0985	1,0975	1,0965	1,0955
1,11	1,1140	1,1127	1,1115	1,1103	1,1091	1,1079	1,1068	1,1057	1,1046
1,12	1,1239	1,1225	1,1214	1,1198	1,1185	1,1172	1,1160	1,1148	1,1136
1,13	1,1337	1,1322	1,1307	1,1293	1,1279	1,1265	1,1252	1,1239	1,1226
1,14	1,1434	1,1418	1,1402	1,1387	1,1372	1,1357	1,1343	1,1329	1,1315
1,15	1,1530	1,1513	1,1497	1,1480	1,1464	1,1448	1,1433	1,1418	1,1403
1,16	1,1626	1,1608	1,1591	1,1573	1,1556	1,1539	1,1523	1,1507	1,1491
1,17	1,1721	1,1702	1,1684	1,1665	1,1647	1,1629	1,1612	1,1595	1,1578
1,18	1,1816	1,1796	1,1777	1,1757	1,1737	1,1718	1,1700	1,1682	1,1664
1,19	1,1910	1,1889	1,1869	1,1848	1,1827	1,1807	1,1788	1,1769	1,1750
1,20	1,2004	1,1982	1,1960	1,1938	1,1916	1,1895	1,1875	1,1855	1,1835

k_i	Значения параметра C								
	2,01	2,02	2,03	2,04	2,05	2,06	2,07	2,08	
1,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
1,01	1,0098	1,0097	1,0096	1,0095	1,0095	1,0094	1,0093	1,0092	
1,02	1,0193	1,0191	1,0190	1,0188	1,0187	1,0185	1,0185	1,0183	
1,03	1,0292	1,0289	1,0286	1,0284	1,0281	1,0279	1,0276	1,0273	
1,04	1,0338	1,0384	1,0380	1,0377	1,0373	1,0370	1,0366	1,0362	
1,05	1,0483	1,0470	1,0473	1,0469	1,0464	1,0460	1,0455	1,0451	
1,06	1,0577	1,0571	1,0565	1,0560	1,0554	1,0549	1,0544	1,0539	
1,07	1,0670	1,0663	1,0656	1,0650	1,0644	1,0638	1,0632	1,0626	
1,08	1,0762	1,0754	1,0747	1,0740	1,0733	1,0726	1,0719	1,0712	
1,09	1,0854	1,0845	1,0837	1,0829	1,0821	1,0813	1,0805	1,0797	
1,10	1,0945	1,0935	1,0926	1,0977	1,0908	1,0899	1,0890	1,0882	
1,11	1,1035	1,1024	1,1014	1,1004	1,0994	1,0985	1,0975	1,0966	
1,12	1,1124	1,1113	1,1102	1,1091	1,1080	1,1070	1,1059	1,1049	
1,13	1,1213	1,1201	1,1189	1,1177	1,1165	1,1154	1,1143	1,1132	
1,14	1,1301	1,1288	1,1275	1,1262	1,1249	1,1237	1,1225	1,1214	
1,15	1,1388	1,1374	1,1360	1,1347	1,1333	1,1320	1,1307	1,1295	
1,16	1,1475	1,1460	1,1445	1,1431	1,1417	1,1402	1,1389	1,1376	
1,17	1,1561	1,1545	1,1530	1,1515	1,1499	1,1484	1,1470	1,1456	
1,18	1,1647	1,1630	1,1614	1,1598	1,1581	1,1565	1,1550	1,1535	
1,19	1,1732	1,1714	1,1697	1,1680	1,1662	1,1645	1,1629	1,1614	
1,20	1,1816	1,1797	1,1779	1,1761	1,1743	1,1725	1,1708	1,1692	

2.4. Выполнение эксперимента и обработка его результатов

Экспериментальную часть работы каждый студент выполняет в лаборатории кафедры при участии лаборанта. Перед проведением эксперимента следует ознакомиться с испытательной машиной, приспособлением для осаживания образца, измерительным инструментом, а также получить инструктаж по технике безопасности у преподавателя или лаборанта и расписаться в журнале.

Испытание образцов и обработку результатов испытания проводят по методике, предложенной Г.А.Смирновым-Аляевым [6].

Для испытания каждый студент получает два цилиндрических образца. До деформации необходимо измерить размеры d_0 , h_0 (рис.2.1а), а после испытания - d и h . Для получения достоверных результатов следует испытывать образец, у которого разность наибольшего и наименьшего значений диаметра цилиндрической части не превышает 0,01 мм. Поэтому диаметр d_0 должен быть измерен в трех сечениях, расположенных в середине и вблизи границ цилиндрической части, в каждом из них в трех направлениях, составляющих между собой угол, равный приблизительно 120° . Необходимую точность измерения можно получить, используя микрометр или инструментальный микроскоп. Вид измерительного инструмента устанавливает студент самостоятельно, руководствуясь требованиями, определяемыми задачами работы.

Степень осаживания образцов задает преподаватель.

Задавшись рядом значений укорочения первого образца Δh_{1i} , необходимо по машинной диаграмме « $P - \Delta h$ » определить соответствующие значения усилия осаживания первого образца P_{1i} . По формуле (2.2) рассчитать значения величины укорочения второго образца Δh_{2i} и по машинной диаграмме « $P - \Delta h$ » определить соответствующие значения усилия осаживания второго образца P_{2i} . Значения параметра C и коэффициента k_{1i} определить по формулам (2.1) и (2.3) соответственно. По табл. 2.1 найти значения коэффициента k и по формуле (2.4) – значения усилия осаживания первого образца без учета влияния

сил трения P_i . Результаты обработки машинных диаграмм и расчетов следует занести в табл.2.2.

Таблица 2.2

Результаты обработки машинных диаграмм

Расчетная точка	Δh_1	P_1	Δh_2	P_2	k_1	k ($C = \underline{\quad}$)	P
0							
1							
2							
·							
n							

Определив значение начальной площади поперечного сечения первого образца F_0 , по формулам (2.5) и (2.6) рассчитать соответствующие значения интенсивности напряжений σ_i и интенсивности деформаций ε_i (результаты расчетов занести в табл.2.3) и построить диаграмму $\sigma_i - \varepsilon_i$.

Таблица 2.3

Координаты точек диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$
по данным испытаний на сжатие

Расчетные точки	Δh_1	P	σ_i	ε_i
0				
1				
2				
·				
n				

2.5. Оборудование, приборы, инструмент, образцы, материалы, необходимые для выполнения задания

1. Испытательная машина ИМ-4А или ИМЧ-30.
2. Приспособление для осаживания образцов.
3. Цилиндрические образцы из металлов и сплавов разных марок.
4. Микрометр.
5. Инструментальный измерительный микроскоп.
6. Бумага - миллиметровка.

2.6. Указания по составлению отчета

Отчет о работе должен содержать: задачи работы, условия и результаты эксперимента, техническую характеристику испытательной машины, исходные данные и результаты определения зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$, анализ зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$. При выполнении студентами группы одновременно испытаний на растяжение и на сжатие целесообразно сравнить полученные результаты.

Диаграмму « $P - \Delta h$ » необходимо включить в отчет в качестве приложения, диаграмму зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$, построенную на миллиметровке, можно поместить в отчет в качестве рисунка или приложения.

При оформлении отчета следует руководствоваться указаниями, изложенными в приложении.

2.7. Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды испытаний применяют для определения функциональной зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$? Каковы достоинства и недостатки методов испытания на сжатие и растяжение?

2. Чем отличаются диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$, построенные по результатам испытаний на растяжение и сжатие?

3. Каково применение зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$ в теории и в инженерной практике?

4. Что учитывает коэффициент k в формуле для расчета усилия осаживания P ?

5. Какой метод испытания использован в лабораторной работе? В чем отличие от других методов построения диаграмм $\sigma_i - \varepsilon_i$ по результатам испытаний на сжатие?

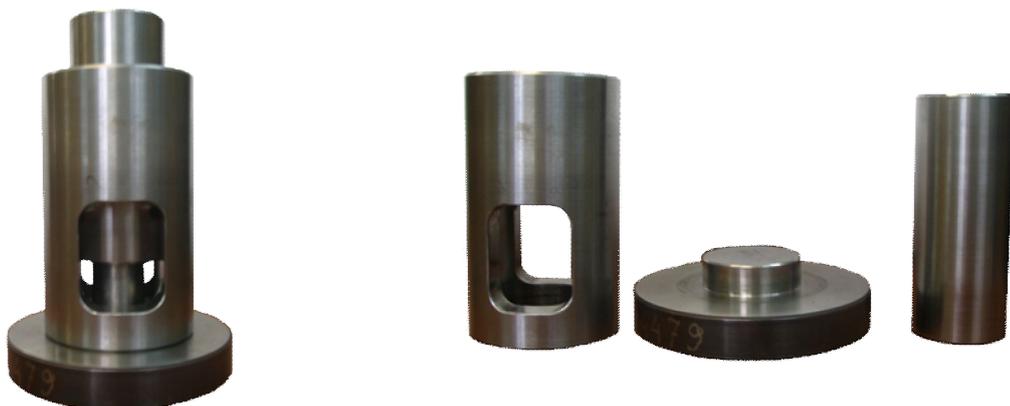


Рис.2.2. Штамп в сборе

Рис.2.3. Детализировка штампа

3.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЙ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗГИБАЕМОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ

3.1. Задачи работы

1. Определение значений и характера изменения вдоль ребра изгиба параметров деформированного и напряженного состояний наружной поверхности заготовки в зоне ребра изгиба.

2. Выявление протяженности вдоль ребра изгиба зоны, в которой пластическая деформация происходит в направлениях всех трех координатных осей ($\varepsilon_\theta \neq 0$, $\varepsilon_r \neq 0$, $\varepsilon_z \neq 0$). Проверка критерия деления заготовок на узкие и широкие.

3. Оценка достоверности формулы для расчета усилия деформирования.

4. Приобретение практических навыков в выполнении научного эксперимента и обработке его результатов.

3.2. Содержание и последовательность выполнения задания, исходные данные

1. Изучить теоретический материал по теме.

2. Измерить размеры заготовки и подготовить ее к деформированию (нанести делительную сетку и измерить размеры ее ячеек).

3. Измерить размеры рабочих деталей штампа, необходимые для расчета усилия деформирования.

4. Вычислить максимальное значение усилия деформирования (P_{\max}) для конечного момента изгиба.

5. Деформировать заготовку (с записью диаграммы «усилие P -перемещение пуансона f »), измерить ее характерные размеры после изгиба.

6. Сравнить расчетное значение усилия с экспериментальным.

7. Измерить размеры ячеек делительной сетки после деформации.

8. Вычислить: главные компоненты и интенсивности

деформации и напряжений ($\varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \varepsilon_r, \varepsilon_i, \sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_i$), характеристики вида деформированного и напряженного состояний ($\nu_{\varepsilon,\sigma}, \beta_{\varepsilon,\sigma}$), характеристику схемы напряженного состояния (K).

9. Построить графики изменения вдоль ребра изгиба всех параметров деформированного и напряженного состояний.

10. Составить отчет.

3.3. Сведения из теории процесса изгиба листового материала. Формулы для расчета усилия деформирования

Изгиб листового материала состоит в повороте части заготовки вокруг некоторой линии, называемой ребром изгиба (рис.3.1,а).

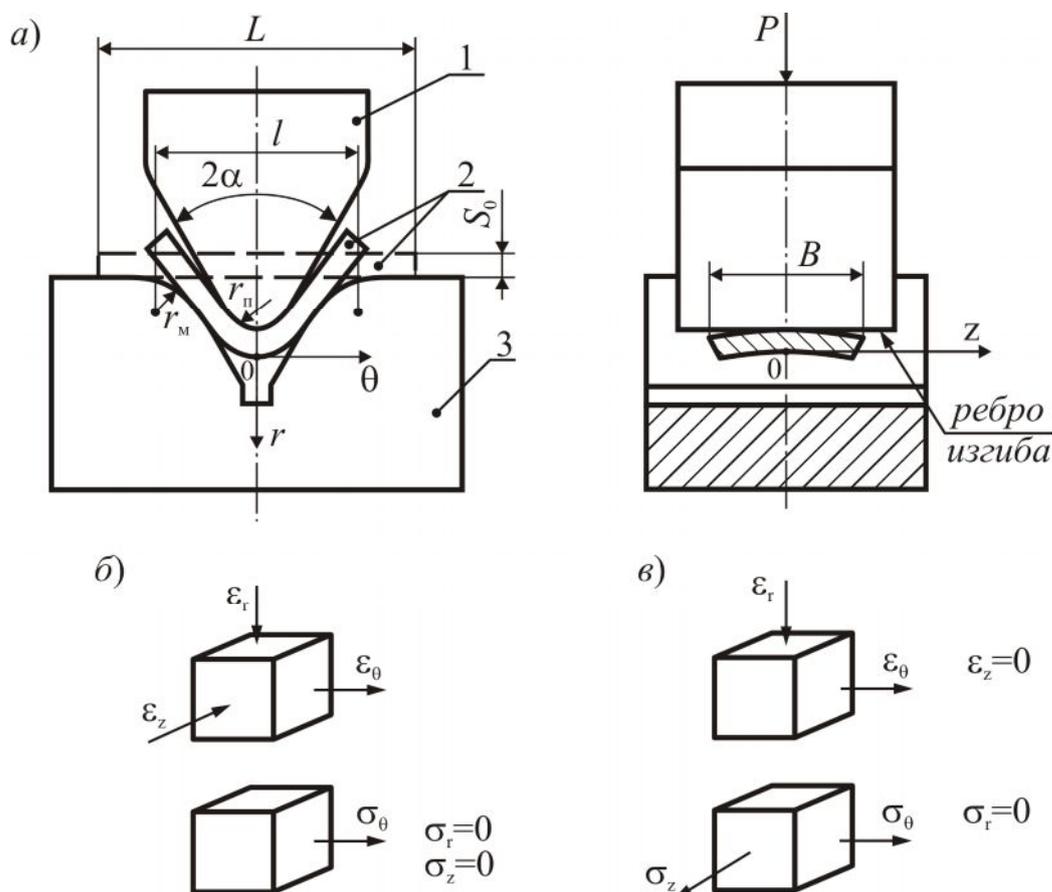


Рис.3.1. Схема изгиба в штампе (а) и схемы деформации и напряжений материального элемента в зоне точки 0 наружной поверхности узкой (б) и широкой (в) листовых заготовок: 1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

При этом происходит пластическая деформация преимущественно в зоне ребра изгиба. В процессе

деформирования во всем объеме очага пластической деформации или в значительной его части заготовка не имеет двухстороннего контакта с инструментом, что обеспечивает "свободное" изменение ее толщины и деформация в большей части объема очага пластической деформации происходит монотонно.

В теории пластического изгиба листовые заготовки делят на узкие и широкие. Это деление определено различием в напряженно-деформированном состоянии.

Для узкой заготовки характерна схема объемной деформации (рис.3.1,б) во всем объеме очага деформации (за исключением зоны нейтральной поверхности). Нормальное напряжение σ_z (в направлении ребра изгиба) пренебрежимо мало по сравнению с тангенциальным σ_θ или равно нулю (на боковых гранях), поэтому напряженное состояние в большей части объема плоское, а на наружной поверхности заготовки и участке внутренней поверхности, свободной от контакта с инструментом, - линейное (рис.3.1,б). У широкой заготовки пластическая деформация в направлении ребра изгиба происходит не по всей ширине, а лишь на участках, прилегающих к боковым граням. Из литературы известно, что протяженность каждого из указанных участков составляет приблизительно 1,5 толщины заготовки, однако каких-либо сведений, подтверждающих это положение, не приведено. В остальной части заготовки компонент деформации ε_z равен нулю, т.е. деформация плоская (рис.3.1,в). Напряженное состояние широкой заготовки почти во всем объеме очага деформации объемное и лишь на свободной поверхности плоское (рис.3.1,в) или линейное (у кромок).

Критерием деления заготовок на узкие и широкие служит значение отношения ширины B заготовки к ее толщине s_0 : к узким относят заготовки, у которых ширина не превышает трех толщин ($B \leq 3s_0$), к широким - заготовки, ширина которых более трех ($B > 3s_0$).

Заметим, однако, что принятое в литературе деление заготовок на узкие и широкие нельзя считать строгим. Целесообразно разделить по указанному критерию заготовки на

три группы: узкие, промежуточные и широкие. К промежуточным следует отнести заготовки, имеющие как участки, прилегающие к боковым граням, с объемной деформацией, так и участок в средней по ширине части заготовки, где деформация плоская, причем протяженность по ширине, заготовки участка с плоской деформацией не превышает суммарной протяженности участков с объемной деформацией. В этом случае к широким должны быть отнесены заготовки, при деформировании которых участок с плоской деформацией по протяженности больше вместе взятых обоих участков с объемной деформацией.

В лабораторной работе поставлена задача экспериментально исследовать деформированное и напряженное состояния наружной поверхности заготовок с разными значениями отношения ширины к толщине B/s_0 и выявить протяженность участков, в пределах которых $\varepsilon_z=0$, с целью проверки и, при необходимости, уточнения значения критерия деления заготовок на узкие и широкие. Параметры напряженно-деформированного состояния следует определить методом делительной сетки.

К числу основных технологических параметров поперечного изгиба (в штампах) относится усилие деформирования.

Задачу о расчете усилия деформирования решали с разных позиций многие исследователи. Однако, ввиду ее сложности, пока не найдено аналитическое решение, которое было бы достаточно строгим в теоретическом отношении и удовлетворяло требованиям практики. Поэтому некоторые исследователи разработали эмпирические и полуэмпирические расчетные формулы, которые, как известно, имеют более жесткие ограничения по области применения.

Одна из наиболее строго обоснованных методик расчета усилия деформирования, содержащая полуэмпирические зависимости [7], разработана на основе результатов аналитического и экспериментального исследования поперечного изгиба применительно к холодной деформации, однако с небольшими изменениями расчетные зависимости могут быть использованы и в случае горячей деформации. Она пригодна для расчета усилия деформирования на участке

восходящей ветви графика «усилие - перемещение пуансона (прогиб заготовки)» при U -, Π - и V -образном изгибе.

Формула для расчета усилия имеет следующий вид:

$$P = 1,5 \frac{Bs_0^2 \sigma_T}{(1 + \mu)l} \left(\frac{s_0}{r_{\Pi}} \right)^{0,25} f^n, \quad (3.1)$$

где σ_T - предел текучести материала заготовки; f - прогиб заготовки (перемещение пуансона); l - расстояние между опорными "точками" матрицы (рис.3.1); r_{Π} - радиус закругления пуансона; μ - коэффициент контактного трения; n - параметр, значение которого зависит от механических свойств материала заготовки, расстояния l и контактных условий.

Наибольшего значения усилие достигает при значении $f = f_{P_{\max}}$, определяемом эмпирической зависимостью:

$$f_{P_{\max}} = (r_M + r_{\Pi}) \frac{10 \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 - 9 \frac{l}{l_0} + 1}{22 \frac{l}{l_0} - 20}, \quad (3.2)$$

где r_M - радиус закругления кромки матрицы (рис. 3.1); l_0 - приведенное расстояние между опорами, вычисляемое по формуле:

$$l_0 = 2 \left[r_{\Pi} + r_M + (1,05 \dots 1,10) s_0 \right]. \quad (3.3)$$

При U - и Π -образном изгибе $l=l_0$ и $f_{P_{\max}} = r_{\Pi} + r_M$.

Для расчета значения параметра n установлена эмпирическая зависимость:

$$n = \frac{0,26(1 + \mu) \left(\sigma_{iy} / \sigma_T \right)^{0,25}}{1 + \left(l/l_0 - 1 \right)^{0,5}}, \quad (3.4)$$

где σ_{iy} - интенсивность напряжений в момент начала образования шейки при испытании растяжением цилиндрического образца из материала заготовки.

Для U - и Π -образного изгиба формула (3.4) имеет вид:

$$n = 0,26(1 + \mu) \left(\sigma_{iy} / \sigma_T \right)^{0,25}. \quad (3.5)$$

В случае V -образного изгиба прогиб заготовки для конечной стадии деформирования (f_k) должен быть вычислен по формуле, установленной из геометрических соотношений (рис.3.1):

$$f_k = \frac{l}{2 \operatorname{tg} \alpha} - (s_0 + r_M + r_{II}) \frac{1 - \sin \alpha}{\sin \alpha}, \quad (3.6)$$

где 2α - угол, образованный рабочими гранями пуансона.

Если $f_k < f_{P_{\max}}$, то при расчете наибольшего значения усилия (P_{\max}) необходимо в формуле (3.1) использовать величину f_k ; когда $f_k \geq f_{P_{\max}}$, значение P_{\max} следует определить для $f_{P_{\max}}$, вычисленного по формуле (3.2).

По формуле (3.1) можно вычислить усилие, соответствующее любому значению прогиба в пределах $f_k \leq f_{P_{\max}}$.

Одна из задач лабораторной работы состоит в проверке достоверности формулы (3.1) путем сопоставления расчетных значений усилия с экспериментальными.

Необходимое для расчета значение коэффициента трения следует определить по справочной литературе, исходя из условий на поверхности контакта заготовки с матрицей.

3.4. Методика исследования напряженно-деформированного состояния наружной поверхности заготовки

При изгибе по схеме, показанной на рис.3.1, наружная поверхность в зоне ребра изгиба в течение всего процесса деформирования не контактирует с инструментом, деформация монотонна, что позволяют определить все параметры деформированного и напряженного состояний наружной поверхности в любой стадии деформации.

Поскольку разные условия деформирования в зонах боковых граней и в средней по ширине части заготовки приводят к искажению формы ее поперечного сечения, целесообразно использовать переносную цилиндрическую систему координат. При этом одна ось (z) должна совпадать с контуром наружной поверхности в поперечном сечении заготовки по ребру изгиба, другая (θ) - с тангенциальным направлением, третья (r) - с направлением нормали к поверхности (рис.3.1). В любой стадии пластического изгиба указанные оси являются главными осями деформации и напряжений, что существенно упрощает решение поставленной задачи.

Для выполнения исследования академическая группа должна быть разделена на бригады по 4...6 человек. Каждый студент получает одну заготовку. Студентам, объединенным в одну бригаду, следует выдать разные по ширине заготовки - узкие, широкие, промежуточные, изготовленные из одного листа. Из того же листа (или из другого листа этой же партии) должны быть изготовлены образцы для испытания растяжением, по результатам испытания этих образцов установлены

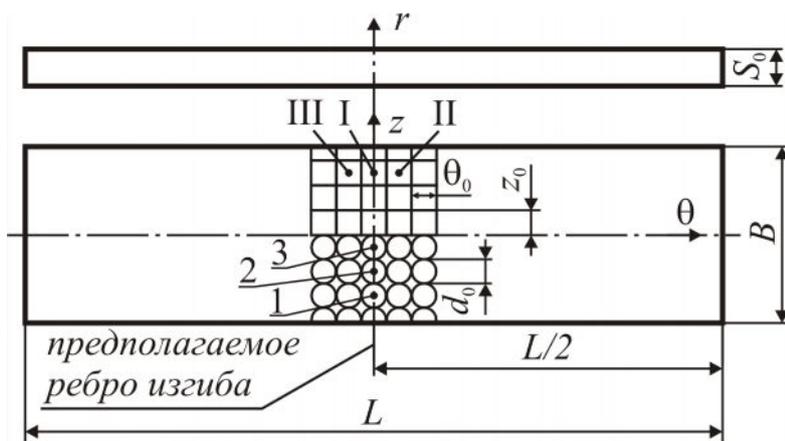


Рис.3.2. Заготовка с нанесенной делительной сеткой до деформации: I, II, III, – номера рядов ячеек; 1, 2, 3 – номера ячеек сетки

зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$ и другие характеристики, необходимые для расчетов. Заготовку нужно очистить от загрязнений, если есть заусенцы, их следует удалить, не притупляя кромок. Одну поверхность

заготовки надо зачистить наждачной бумагой для последующего нанесения делительной сетки. (Заготовки с гладкой и светлой поверхностью могут быть использованы без зачистки.) На подготовленную поверхность нанести типографским способом делительная сетка с круглыми или квадратными ячейками (рис.3.2), диаметр (сторона квадрата) которых составляет 0,5...1,5 мм. Сетку следует нанести так, чтобы ряды ее ячеек были параллельны большей сторонам заготовки. Необходимо обеспечить высокое качество сетки пяти - семи рядов ячеек, направленных по ширине заготовки, в зоне будущего ребра изгиба. Для решения поставленной задачи достаточно иметь один ряд ячеек надлежащего качества, остальные ряды резервные, на случай повреждения сетки или смещения ребра изгиба от намеченного положения.

Диаметр d_0 (стороны квадрата – θ_0, z_0) (рис.3.2) всех ячеек сетки основного и резервных рядов следует измерить

инструментальным микроскопом с погрешностью не более + 0,01мм. При высоком качестве сетки нет необходимости измерять размеры каждой ячейки, достаточно измерить несколько ячеек, расположенных в разных зонах массива, или группы ячеек. Чтобы предохранить сетку от повреждения, участок поверхности с сеткой необходимо покрыть прозрачным лаком, предварительно высушив нанесенную типографскую краску. Заготовку можно деформировать после того, как лак высохнет настолько, что не будет прилипать к инструменту. В то же время лак должен быть достаточно пластичным, чтобы не произошло его отслаивание в процессе деформации. Время сушки лака зависит от его состава и толщины слоя.

Размеры ячеек сетки после деформирования следует измерить инструментальным микроскопом в направлении ребра изгиба (по контуру наружной поверхности, размер θ и в тангенциальном направлении размер z). Поскольку размеры ячеек сетки малы по сравнению с радиусом кривизны поверхности изогнутой заготовки, допустимо считать значением θ результат измерения по хорде.

Параметры деформированного и напряженного состояний необходимо вычислить по следующим зависимостям, которые справедливы при конечной монотонной холодной деформации:

$$\varepsilon_{\theta} = \ln \frac{\theta}{d_0} = \ln \frac{\theta}{\theta_0} ,$$

$$\varepsilon_z = \ln \frac{z}{d_0} = \ln \frac{z}{z_0} ,$$

$$\varepsilon_r = -(\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_z) ,$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_{\theta})^2 \right]^{0,5} ,$$

$$v_{\varepsilon} = \frac{3\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} ,$$

$$\sigma_i = (\sigma_i)_{\text{пр}} - C e^{-\varepsilon_i} - C_1 e^{-N\varepsilon_i} ,$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_r) ,$$

$$\sigma_z = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_z - \varepsilon_r),$$

$$v_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3},$$

$$K = \frac{\sigma_\theta + \sigma_z}{\sigma_i}, \quad (3.7)$$

$$\beta_{\varepsilon,(\sigma)} = 30^\circ + \operatorname{arctg} \left(0,5774 v_{\varepsilon(\sigma)} \right),$$

где d_0 , θ_0 , z_0 , d , θ , z - размеры ячеек сетки до и после деформации; ε_1 , ε_2 , ε_3 - компоненты деформации вдоль координатных осей, индексы которых заменены на цифровые по условию: $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$; K - характеристика схемы напряженного состояния; $(\sigma_i)_{\text{пр}}$ - предельное значение интенсивности напряжений; C , C_1 , N - параметры зависимости $\sigma_i - \varepsilon_i$; e - основание натурального логарифма.

В формуле (3.7) учтено, что наружная поверхность заготовки в зоне ребра изгиба не контактирует с инструментом, поэтому компонент σ_r равен нулю. Так как деформация монотонная, то в каждой ячейке значения характеристик вида деформированного и напряженного состояний должны быть равны ($v_\varepsilon = v_\sigma$, $\beta_\varepsilon = \beta_\sigma$).

Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния необходимо оформить в виде табл.3.1.

По результатам расчета должны быть построены графики изменения вдоль ребра изгиба всех параметров напряженно-деформированного состояния. Для наглядности графики следует изобразить (отнеся значения параметров к центрам ячеек) наложенными на контур поперечного сечения заготовки, выполненный с большим увеличением, при этом должно быть учтено искажение формы этого сечения.

Таблица 3.1

Параметры напряженно-деформированного состояния,
заготовка № ____ ($B/s_0 =$ ____)

№	Размер ячейки	Параметры напряженно-
---	---------------	-----------------------

	деформированного состояния													
	θ_0	z_0	θ	z	ε_ε	ε_z	ε_r	ε_i	σ_i	σ_θ	σ_z	K	$\nu_{\varepsilon,z}$	$\beta_{\varepsilon,\sigma}$
	d_0								кг/мм ² (МПа)					град.
1														
2														
3														
4														

По изменению размера z_0 ячеек сетки необходимо определить протяженность (B_1) участков у боковых граней заготовки, в пределах которых $\varepsilon_z \neq 0$. При этом следует считать компонент ε_z равным нулю как ячеек, значение размера z которых оказалось равным z_0 , так и тех ячеек, изменение размера z_0 которых не превышает величины погрешности измерения. Значение B_1 (односторонний размер) представляет собой сумму ячеек сетки, компонент деформации ε_z которых не равен нулю.

3.5. Выполнение эксперимента и обработка его результатов

Экспериментальную часть работы студенты выполняют в лаборатории кафедры при участии лаборанта. Перед проведением эксперимента каждому студенту необходимо ознакомиться с оборудованием, штампом, измерительными инструментами, приспособлением для нанесения делительной сетки и другими материалами, а также получить инструктаж по технике безопасности. Инструктаж проводит преподаватель или лаборант, об инструктаже должна быть сделана запись в соответствующем журнале.

Получив заготовку, студент должен подготовить ее к нанесению делительной сетки (в соответствии с рекомендациями, изложенными в разд.4), после чего измерить толщину s_0 , ширину B и длину L заготовки, а также размеры (2α , $r_{\text{П}}$, $r_{\text{М}}$, l) инструмента, необходимые для расчета P_{max} . Способ измерения, измерительный инструмент и точность измерения определяет каждый студент самостоятельно, исходя из задач работы. Затем следует нанести делительную сетку.

Деформировать заготовку необходимо на испытательной машине, записать на миллиметровой бумаге записывающим устройством силоизмерительного механизма машины диаграмму «усилие деформирования (P) - перемещение (f) пуансона (прогиб заготовки)».

Момент окончания изгиба соответствует началу соприкосновения полок заготовки по всей их поверхности со стенками матрицы. На диаграмме в этот момент наступает интенсивный рост усилия. Подготавливает заготовку и штамп к деформированию, а также записывающее устройство испытательной машины к записи диаграммы каждый студент самостоятельно под контролем лаборанта. Во время деформирования студент обязан наблюдать за формоизменением заготовки и записью диаграммы.

Записанную машинную диаграмму $P - f$ следует обработать, нанести координатные оси и шкалы, указать масштабы записи усилия и прогиба, значение P_{\max} , номер, размеры и материал заготовки, номер комплекта рабочего инструмента.

Для определения величины изменения размеров поперечного сечения в зоне ребра изгиба необходимо измерить наибольший B_{\max} и наименьший B_{\min} размеры ширины деформированной заготовки, а также ее толщину s в середине ширины. Размеры заготовки (до и после деформации), а также размеры инструмента следует измерить, как правило, трижды (в необходимых случаях в разных зонах). Результаты всех измерений должны быть оформлены в виде табл.3.2 с указанием в пояснительном тексте использованного инструмента и погрешности измерения. Об измерении размеров ячеек делительной сетки и расчете параметров напряженно-деформированного состояния см. в разд.4.

Таблица 3.2

Расчетные и экспериментальные значения параметров деформирования

Номер заготовки	s_0	B	$\frac{B}{s_0}$	B_{\max}	B_{\min}	B_1	s	$\frac{B_{\max}}{B}$	$\frac{B_{\min}}{B}$	$\frac{s}{s_0}$	$\frac{2B_1}{s_0}$	P_{\max}	$P_{\max,э}$	Δ
	мм			мм								кг (кН)		%

1														
2														
3														

$2\alpha =$ _____, $r_{II} =$ _____ мм, $r_M =$ _____ мм, $l =$ _____ мм,
 $\mu =$ _____, материал заготовок - _____,
 $\sigma_T =$ _____ кг/мм², $\sigma_{iy} =$ _____ кг/мм²

Последующий этап работы состоит в определении отклонения расчетного значения P_{max} от экспериментального ($\Delta (P_{max} - P_{max,э}) / P_{max,э}$), величины изменения толщины (s/s_0) и ширины (B_{max}/B , B_{min}/B) заготовки, относительного значения протяженности по ширине заготовки ($2B_1/B$) участков, в пределах которых $\varepsilon_z \neq 0$. Если $(2B_1/B) < 1$, следует вычислить также отношение $2B/s_0$, определяющее границу узких заготовок.

Заключительный этап работы: анализ результатов расчета и эксперимента всех студентов бригады и формулирование выводов в соответствии с решаемыми задачами. В связи с этим в отчете каждого студента должны быть представлены сводные таблицы (табл.3.1 и 3.2) основных сведений по всем заготовкам бригады.

3.6. Оборудование, приборы, инструменты, материалы, необходимые для выполнения эксперимента

1. Испытательная машина ИМЧ-30 или ГМС-50.
2. Штамп для изгиба листовых заготовок.
3. Микрометр, штангенциркуль, радиусомер, инструментальный измерительный микроскоп.
4. Заготовки из листового металла (сплава) разных марок с различным отношением ширины к толщине.
5. Приспособление для нанесения сетки типографским способом.
6. Смазочный материал (минеральное масло и др.), наждачная бумага, ацетон, лак для покрытия заготовки с нанесенной сеткой, миллиметровая бумага.

3.7. Указания по составлению отчета

Отчет о работе каждый студент выполняет самостоятельно. Отчет должен содержать: задачи работы; условия и результаты эксперимента; машинную диаграмму $P - f$; графики изменения вдоль ребра изгиба параметров напряженно-деформированного состояния наружной поверхности заготовки автора отчета; таблицу исходных данных для расчета, расчетных и экспериментальных значений усилия, размеров заготовок бригады до и после деформации (по форме табл.3.2); таблицу значений параметров напряженно-деформированного состояния заготовок бригады (по форме табл. 3.1). В отчете необходимо привести схему изгиба, эскизы рабочих деталей штампа и заготовки (с нанесенной сеткой) до и после деформации, техническую характеристику испытательной машины, расчет усилия деформирования и параметров напряженно-деформированного состояния, анализ результатов расчета и эксперимента всех студентов бригады, выводы по результатам работы.

При оформлении отчета следует руководствоваться указаниями, изложенными в приложении.

3.8. Вопросы для самоконтроля

1. По какому критерию разделены листовые заготовки на узкие и широкие? Что отражает принятый критерий?
2. Подтверждено ли выполненным экспериментом приведенное в литературе значение критерия деления листовых заготовок на узкие и широкие ?
3. Каков характер изменения по ширине заготовки параметров напряженно-деформированного состояния в зоне ребра изгиба?
4. Чем вызвано искажение формы поперечного сечения заготовки в зоне ребра изгиба? У каких заготовок искажение меньше?
5. Одинаково ли значение предельной пластической деформации материала узкой и широкой заготовок? Укажите зону заготовки, где предельная деформация наименьшая.
6. В чем состоит отличие поперечного изгиба листовой

заготовки от кругового по напряженно-деформированному состоянию?

7. На каких положениях основана использованная в работе методика расчета усилия изгиба листовой заготовки ? Какова область применения этой методики?

8. К какой группе процессов обработки металлов давлением по классификации Г.А.Смирнова-Аляева отнесен изгиб листовой заготовки? Что характерно для процессов этой группы?

9. Каков результат оценки достоверности формулы для расчета усилия изгиба?

10. Какой вид имеет график изменения усилия в процессе изгиба? Объясните характер изменения усилия. Назовите факторы, определяющие величину усилия.

11. Какие практические навыки Вы приобрели (закрепили) при выполнении лабораторной работы?



Рис.3.3. Штамп гибки листовых материалов в начальной (а) и конечной (б) стадии



Рис.3.4. Заготовка (а) и согнутая деталь (б)

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОЙ

ПОВЕРХНОСТИ ОСАЖИВАЕМОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

4.1. Задачи работы

1. Определение значений и характера изменения вдоль радиуса параметров деформации контактной поверхности цилиндра.
2. Исследование влияния контактных условий, относительных размеров деформируемой заготовки и величины осадки на деформацию контактной поверхности и размеры зон торможения и скольжения.
3. Оценка достоверности методики расчета усилия деформирования.
4. Приобретение практических навыков в выполнении научного эксперимента и обработке его результатов.

4.2. Содержание и последовательность выполнения задания

1. Изучить теоретический материал по теме.
2. Измерить размеры заготовки и подготовить ее к деформированию (нанести на торцы делительную сетку и измерить размеры ее ячеек).
3. Деформировать заготовку (с записью диаграммы «усилие P - перемещение пуансона Δh »), измерить ее размеры после осадки.
4. Измерить размеры ячеек делительной сетки после деформации.
5. Вычислить значения компонентов и интенсивности деформации ε_z , ε_θ , ε_r , ε_i , характеристики вида деформированного состояния v_ε каждой из выбранных ячеек сетки.
6. Построить графики изменения вдоль радиуса всех параметров деформации.
7. Определить размеры зон скольжения и торможения.
8. Вычислить усилие деформирования для конечной (фактической) стадии осадки и сравнить расчетное значение с экспериментальным.
9. Составить отчет.

4.3. Сведения из теории процесса свободной осадки плоскопараллельными плитами

Процесс свободной осадки (сжатия) состоит в уменьшении размера в направлении действия приложенной силы с одновременным свободным (без внешнего воздействия) увеличением поперечных размеров деформируемого тела.

Важное место в теории и практике занимает осадка плоскопараллельными плитами (рис.4.1) тел (заготовок) с односвязным контуром и постоянными (по направлению осадки) формой и размерами поперечного сечения. Из многообразия форм поперечного сечения заготовок целесообразно выделить две, которые по условиям и характеру деформации следует считать крайними, остальные находятся между ними.

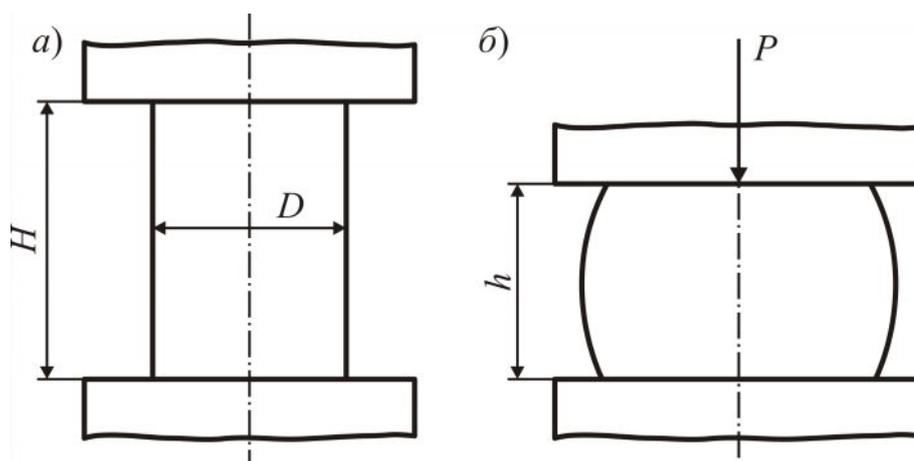


Рис.4.1. Схема свободной осадки (сжатия) плоскопараллельными плитами цилиндрической заготовки в торец: а – до деформации, б – в текущей стадии деформации

Этими формами служат круг (цилиндрическая заготовка) и прямоугольник (призматическая заготовка) с большим отношением длины к ширине.

При осадке цилиндрической заготовки вдоль ее оси симметрии условия деформации по всем диаметральным направлениям в каждом из поперечных сечений одинаковы. В этом случае в центральной части заготовки вид деформированного состояния близок к простому сжатию, а на оси симметрии - простое сжатие (характеристика вида $\nu_\varepsilon = 1$). Если контактное трение мало, то можно считать, что во всем объеме заготовки вид деформированного состояния

соответствует простому сжатию или близок к нему.

При осадке заготовки, имеющей в поперечном сечении форму прямоугольника с большим отношением длины L к ширине A , условия деформации вдоль направлений L и A резко различны. В направлении длины перемещение материала затруднено контактным трением в значительно большей мере, чем по ширине. Если длина прямоугольника много больше ширины, то деформация в направлении L происходит лишь на участках небольшой протяженности у концов прямоугольника, в остальной части этот компонент деформации практически равен нулю. Следовательно, в случае осадки указанной призматической заготовки в большей части ее объема деформация плоская (вид деформированного состояния - простой сдвиг, $v_\varepsilon = 0$).

Отмеченные крайние формы заготовок обуславливают простейшие виды деформации, которым уделено основное внимание при экспериментальном и аналитическом исследовании процесса осадки.

Экспериментально установлено, что при наличии контактного трения деформация заготовки происходит неравномерно. Причиной неравномерности деформации служат силы трения, возникающие на поверхностях контакта заготовки с инструментом и препятствующие перемещению в поперечных направлениях частиц металла в приконтактных зонах, вследствие чего их деформация затруднена. (Указанное положение не относится к тончайшему, в пределах микронеровностей, поверхностному слою, в котором деформация может быть весьма большой). По мере удаления от контактной поверхности влияние контактного трения ослабевает. Поэтому величина деформации зон заготовки, удаленных от контактных плоскостей больше, чем приконтактных. Внешним признаком неравномерности деформации является искривление боковой поверхности заготовки.

Влияние трения на деформацию заготовки проявляется весьма сложно [8]. Неравномерность деформации зависит не только непосредственно от значений сил контактного трения, но и от осадки (общей деформации), а также от отношения высоты

заготовки к ее наименьшему поперечному размеру. По объему заготовки неравномерность деформации тем меньше, чем меньше силы контактного трения и относительная высота заготовки и чем больше величина осадки.

Деформация контактной поверхности также неравномерна. В общем случае по величине деформации контактную поверхность можно разделить на две зоны (рис.4.2): периферийную и центральную. В периферийной зоне, называемой зоной скольжения, происходит перемещение материала заготовки от центра к контуру, что свидетельствует о деформации частиц поверхностного слоя металла. В центральной зоне контактной поверхности, называемой зоной торможения, нет перемещения материала заготовки относительно инструмента.

Отношение площадей зон скольжения и торможения, характеризующее неравномерность деформации контактной поверхности, не постоянно и зависит от тех же факторов, которые определяют неравномерность деформации по объему заготовки.

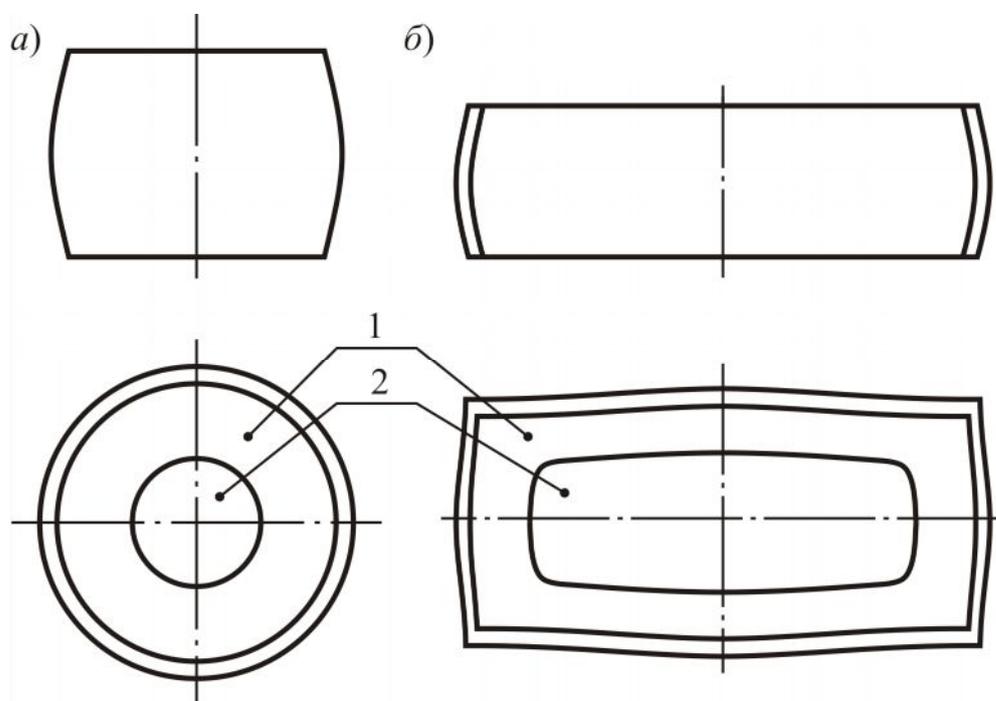


Рис.4.2. Зоны скольжения (1) и торможения (2) на контактной поверхности цилиндрической (а) и призматической (б) заготовок при свободной осадке плоскопараллельными плитами

Чем меньше силы контактного трения и относительная

высота заготовки и чем больше величина осадки, тем большая часть контактной поверхности занята зоной скольжения. Указанное влияние величины осадки на отношение площадей зон скольжения и торможения свидетельствует об уменьшении размеров зоны торможения в процессе деформации. По утверждению Е.П.Унксова [8], зона торможения полностью не исчезает даже при очень большой деформации. Однако результаты последующих исследований показали, что это положение справедливо не всегда. При определенных условиях зона скольжения занимает всю контактную поверхность, причем даже в случае относительно небольшой величины осадки. Нередко возникает другое крайнее состояние, когда практически вся контактная поверхность охвачена зоной торможения. Размеры зон скольжения и торможения зависят от характера изменения касательных напряжений, вызванных контактным трением.

Хотя процесс свободной осадки исследуют длительное время, удовлетворительного математического описания деформированного состояния заготовки до сих пор не разработано. Мело и экспериментальных данных.

В настоящей работе исследуется методом делительной сетки деформация контактной поверхности цилиндрических заготовок из разных материалов при различных контактных условиях, относительных размерах заготовок и величине осадки. При этом следует определить соотношение площадей зон скольжения и торможения.

К числу основных технологических параметров осадки принадлежит усилие деформирования. Задачу о расчете усилия осадки решали с разных позиций многие исследователи. Ниже приведен результат решения, предложенного Г.А.Смирновым-Аляевым [3].

Для цилиндрической заготовки, осаживаемой в торец (осесимметричная деформация), расчетная формула в сокращенной записи имеет следующий вид:

$$P = F \sigma_i \psi , \quad (4.1)$$

где P - усилие деформирования; F - средняя по высоте заготовки площадь сечения, перпендикулярного направлению осаживания;

σ_i - среднее по объему значение интенсивности напряжений материала заготовки в текущей стадии деформации; ψ - функция коэффициента контактного трения (μ) и отношения (φ) диаметра заготовки к ее высоте в текущей стадии деформации.

Площадь F определена формулой, выражающей условие сохранения объема заготовки:

$$F = (F_0 H) / h ,$$

где H, F_0 - высота и площадь поперечного сечения заготовки до деформации соответственно; h - высота заготовки в расчетной стадии деформации.

Для вычисления σ_i в случае холодной деформации необходима зависимость «интенсивность напряжений (σ_i) – интенсивностью деформации (ε_i)» в виде диаграммы или аппроксимирующей функции. Среднее значение ε_i :

$$(\varepsilon_i)_{\text{cp}} = \ln(H/h).$$

Для сокращения времени, затрачиваемого на расчет усилия, используют таблицу (табл.4.1) значений функции ψ [2,7], входными параметрами которой служат коэффициент трения и отношение φ : $\varphi = d/h$, где $d = D(H/h)^{0,5}$ - среднее по высоте значение диаметра заготовки в текущей стадии деформации; D - диаметр заготовки до деформации.

Одна из задач лабораторной работы состоит в проверке достоверности формулы (4.1) путем сравнения расчетных значений усилия с экспериментальными.

Таблица 4.1

Значения функции ψ [2,7]

φ	μ						
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	1,025	1,037	1,050	1,062	1,075	1,087	1,100
2	1,050	1,075	1,100	1,125	1,150	1,175	1,200
3	1,098	1,151	1,208	1,268	1,332	1,398	1,438
4	1,142	1,223	1,312	1,410	1,510	1,580	1,620
5	1,186	1,297	1,423	1,563	1,675	1,751	1,793
6	1,231	1,375	1,544	1,715	1,840	1,920	1,964
7	1,278	1,459	1,676	1,870	2,004	2,088	2,132

8	1,328	1,551	1,813	2,028	2,169	2,255	2,301
9	1,380	1,650	1,955	2,187	2,334	2,422	2,468
10	1,435	1,757	2,101	2,347	2,500	2,589	2,636

4.4. Исследование деформации контактной поверхности заготовки

Для выполнения исследования учебную группу следует разделить на бригады по 4...6 человек. Каждый студент получает одну заготовку, а также указание о том, какой комплект рабочего инструмента приспособления для осадки необходимо использовать и как должны быть подготовлены к деформированию торцы заготовки и рабочие поверхности инструмента.

Всем студентам одной бригады следует выдать одинаковые по материалу, размерам и качеству поверхности торцов заготовки (изготовленные по одной технологии из материала одной партии). Условия эксперимента в бригаде для всех заготовок должны быть строго одинаковыми, различие лишь в величине осадки λ ($\lambda = (H - h)/H$), которую следует назначить в пределах от 0,1 до 0,6.

В заданиях разным бригадам отличаются либо в относительные размеры заготовок, либо условия на контактной поверхности (использование рабочего инструмента с различной шероховатостью контактной поверхности и смазки разного качества или деформирование без смазки).

Таким образом, учебной группой (или двумя - тремя группами) можно исследовать влияние на деформацию контактной поверхности всех трех факторов: контактных условий, величины осадки и относительных размеров заготовки.

Заготовку необходимо очистить от грязи, удалить заусенцы, не притупляя кромок, на торцах возможные неровности поверхности нужно зачистить наждачной бумагой, после чего на оба торца нанести накатыванием типографской краски делительную сетку с круглыми или квадратными ячейками (рис.4.3,*a*), диаметр (сторона квадрата) которых составляет 0,5...1,5 мм. Сетку следует нанести так, чтобы центр торца был внутри одной из ячеек.

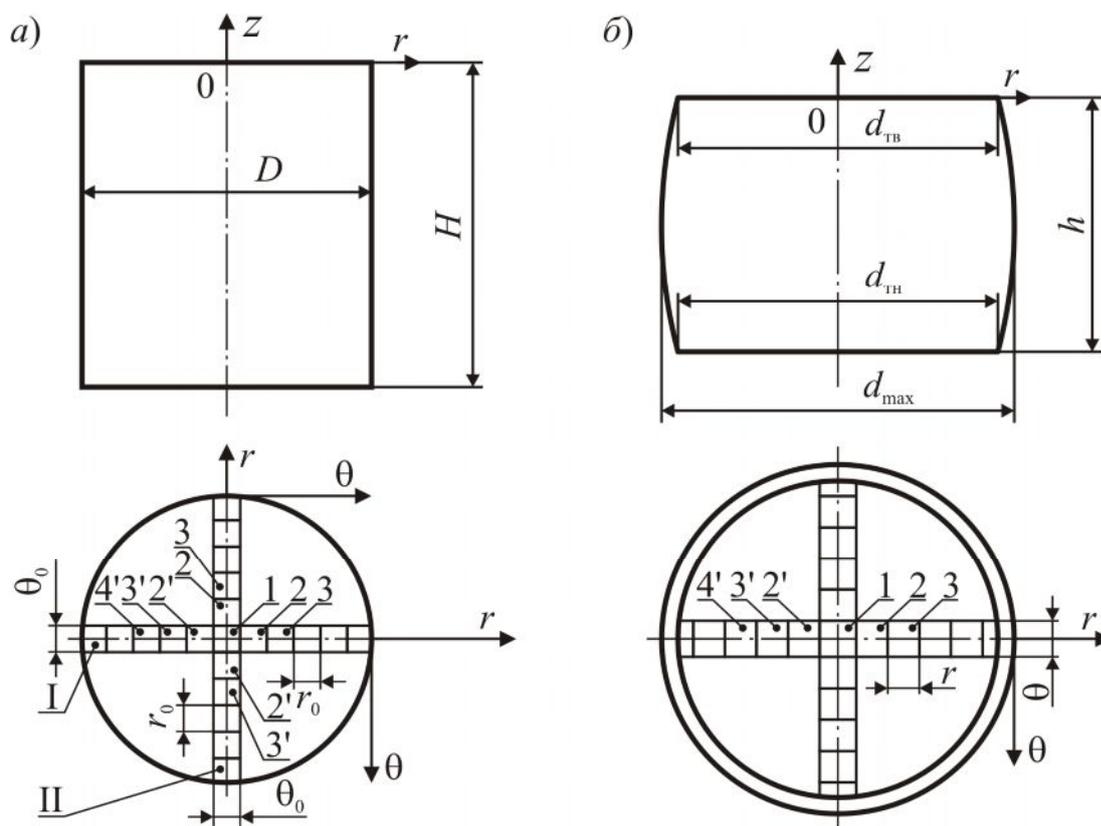


Рис.4.3. Цилиндрическая заготовка с нанесенной делительной сеткой: *а* – до деформации; *б* – после деформации

Для решения поставленных задач достаточно знать размеры ячеек, расположенных вдоль какого-либо радиуса на одном из торцов. Однако в связи с возможным повреждением сетки в процессе деформации и другими отклонениями от нормального хода эксперимента необходимо обеспечить высокое качество и измерить размеры всех ячеек взаимно-перпендикулярных рядов, проходящих через центр каждого из торцов (рис.4.3,*а*). Размеры r_0 , θ_0 всех ячеек указанных рядов сетки следует измерить инструментальным микроскопом с погрешностью не более $\pm 0,01$ мм. Чтобы предохранить сетку от повреждения, поверхности торцов целесообразно покрыть тонким слоем прозрачного лака, предварительно высушив нанесенную типографскую краску. Заготовку можно деформировать после того, как лак высохнет настолько, что не будет прилипать к инструменту, оставаясь достаточно пластичным, чтобы не произошло его разрушения и отслаивания в процессе деформации. Время сушки лака зависит от его состава и толщины слоя.

Поскольку лак в значительной мере определяет величину контактных касательных напряжений, необходимо все заготовки, при деформировании которых контактные условия должны быть одинаковыми, покрыть лаком в течение одного дня и одним способом, деформировать надо также в один день.

Если по условиям эксперимента предусмотрено применение смазки, то смазать следует лишь инструмент. Все требования по подготовке контактных поверхностей к деформированию должны быть выполнены строго, ибо отклонение от заданных условий может существенно изменить характер деформации и сделать результаты эксперимента с разными заготовками непригодными для обобщения.

После деформации необходимо измерить инструментальным микроскопом с минимально возможной погрешностью размеры r и θ (рис.4.3,б) всех ячеек сетки, расположенных вдоль одного из диаметров на каком-либо торце.

В связи с тем, что значения параметров деформации относят к центру ячейки, а в пределах ячейки размер θ переменный, его надо измерить на уровне середины размера r . Наличие размеров двух ячеек, одинаково отстоящих от центральной (1-й), облегчает контроль измерения. У заготовок, принадлежащих студентам одной бригады, для измерения следует принять ячейки на одном из торцов - верхнем или нижнем. Это требование обусловлено возможным различием в деформации участков, прилегающих к подвижному (верхнему) и неподвижному (нижнему) торцам заготовки.

Размеры ячеек сетки непосредственно определяют значения радиального (ε_r) и тангенциального (ε_θ) компонентов деформации:

$$\varepsilon_r = \ln\left(\frac{r}{r_0}\right), \quad \varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right).$$

Здесь принято, что тангенциальный компонент деформации выражен изменением размера по хорде (θ_0), причем неизбежное искривление в процессе деформации этого отрезка не учтено, ввиду незначительного влияния искривления на значение компонента. Это - приближенная оценка. Для строгой оценки необходимо знать изменение расстояния между центром ячейки

и центром торца, т.е. значения радиуса, на котором находится центр ячейки ($\varepsilon_\theta = \ln R/R_0$). Однако определить с необходимой точностью изменение указанного расстояния затруднительно, поэтому приближенную оценку, погрешность которой не больше погрешности строгой оценки, можно считать предпочтительной.

Для расчета значения компонента ε_z имеем уравнение, вытекающее из условия сохранения объема частицы:

$$\varepsilon_r = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z).$$

Допуская, что координатные оси r и z совпадают с главными осями деформации и учитывая, что тангенциальное направление θ является главной осью (так как деформация осесимметричная), приходим к следующим зависимостям для расчета приближенных значений интенсивности деформации ε_i и характеристики вида деформированного состояния v_ε :

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 \right]^{0,5},$$

$$v_\varepsilon = \frac{3\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3},$$

где ε_1 , ε_2 , ε_3 - компоненты деформации вдоль координатных осей, индексы которых заменены на цифровые по условию: $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$.

Все приведенные расчетные формулы основаны на предположении о монотонности деформации поверхностного слоя на торцах заготовки.

Поскольку деформация осесимметричная, достаточно вычислить параметры деформации лишь ячеек, расположенных вдоль радиуса в одном направлении, считая центральную ячейку за начало отсчета.

Размеры ячеек до и после деформирования, результаты расчета параметров деформированного состояния необходимо оформить в виде табл.4.2.

По результатам расчета должны быть построены графики изменения вдоль радиуса всех параметров деформации. Для наглядности графики следует изобразить наложенными на

контур заготовки, выполненный с большим увеличением.

Таблица 4.2

Размеры (мм) ячеек сетки и значения параметров деформации
(заготовка № ____, $D/H =$ _____, $\lambda =$ _____, _____ торец)

Номер ячейки	Параметр				
	ε_r	ε_θ	ε_z	ε_i	ν_ε
1					
2					

Наличие на исследуемой контактной поверхности зоны торможения и диаметр $d_{зт}$ этой зоны можно установить по результатам сравнения размеров ячеек сетки до и после деформации. Из-за относительно большой погрешности измерения размеров ячеек накатанной сетки недеформированную зону трудно отделить от зоны с малой деформацией. Поэтому целесообразно отнести к зоне торможения ячейки, изменение размеров которых не превышает величины погрешности измерения.

4.5. Выполнение эксперимента и обработка его результатов

Экспериментальную часть работы студенты выполняют в лаборатории кафедры при участии лаборанта. Перед проведением эксперимента каждый студент должен ознакомиться с оборудованием, приспособлением для осадки (рис.4.4), измерительными инструментами, приспособлением для нанесения делительной сетки и другими материалами, а также с правилами по технике безопасности, затем необходимо расписаться в соответствующем журнале.

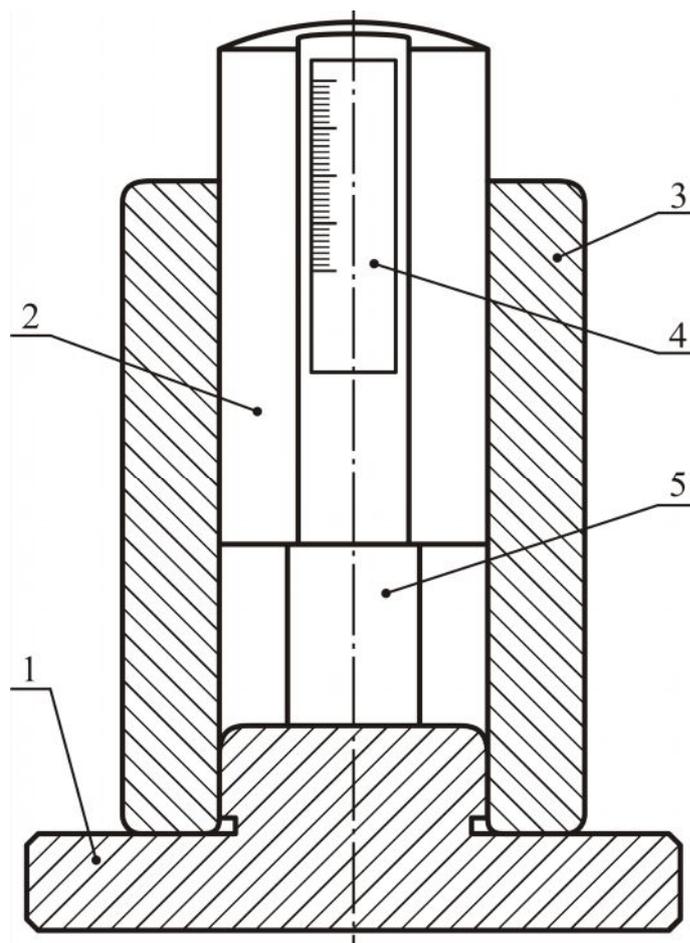


Рис.4.4. Приспособление для деформирования осадкой (сжатием) плоскопараллельными плитами: 1 – основание (нижняя плита); 2 – пуансон (верхняя плита); 3 – втулка направляющая; 4 – масштабная линейка; 5 – заготовка

После подготовки заготовки к нанесению делительной сетки (в соответствии с указаниями, изложенными в разд.4) следует измерить ее диаметр и высоту, выявить качество изготовления заготовки, определив отклонение от параллельности торцов, которое не должно превышать 0,01 мм, отклонение от перпендикулярности торцов боковой поверхности (не более 0,01...0,03 мм в зависимости от высоты заготовки), некруглость (не более 0,02 мм) и нецилиндричность (не более 0,01 мм). Способ измерения, измерительный инструмент и допустимую погрешность измерения устанавливает каждый студент самостоятельно, руководствуясь задачами работы. Затем следует нанести на торцы делительную сетку (см. разд.4).

Деформировать заготовку необходимо на испытательной машине модели ИМЧ-30 (или ГМС-50), при этом записать на

миллиметровой бумаге записывающим устройством силоизмерительного механизма машины диаграмму «усилие (P) - перемещение пуансона (Δh)». При деформировании всех заготовок, используемых в одном эксперименте, скорость нагружения должна быть приближенно одинаковой.

За изменением высоты заготовки в процессе деформирования можно наблюдать по масштабной линейке, прикрепленной к одной из деталей приспособления, или по индикатору, который для этого следует установить на приспособлении.

Подготавливать к деформированию оборудование, приспособление для осадки и заготовку, а также наблюдать за деформированием и записью диаграммы «усилие-перемещение пуансона» должен каждый студент под контролем лаборанта.

После деформирования следует измерить: высоту заготовки (рис.4.4) в центре контактной поверхности и в четырех зонах на периферии по концам взаимно перпендикулярных рядов ячеек, проходящих через центр; диаметры торцов (верхнего - $d_{\text{ТВ}}$ и нижнего $d_{\text{ТН}}$, в соответствии с положением, заготовки в приспособлении); наибольший диаметр d_{max} . Диаметры необходимо измерить в трех направлениях, составляющих между собой угол, приближенно равный 120 градусов.

Результаты измерения размеров заготовки должны быть представлены в форме таблицы с указанием в пояснительном тексте использованного инструмента и погрешности измерения.

Об измерении размеров ячеек делительной сетки (и расчете параметров деформации) изложено в разд.4.4.

Записанную машинную диаграмму $P - \Delta h$ следует обработать: нанести координатные оси и шкалы; указать масштабы записи усилия и перемещения, значение усилия в конечной стадии деформаций, номер заготовки, ее размеры до деформации, марку материала, величину осадки $\lambda_{\text{факт}}$, состояние поверхности, смазку.

Следующий этап работы - расчет значения усилия деформирования P_p для конечной стадии осадки (по результату измерения h для осадки $\lambda_{\text{факт}}$) и определении отклонения результата расчет от экспериментального значения

$\Delta \left(\frac{P_p}{P_s} - P_s \right) / P_s$. Вычислить усилие деформирования и сравнить расчетное значение с экспериментальным можно для любой стадии осадки, а не только для конечной. Однако определить с необходимой строгостью соответственные экспериментальные значения усилия и текущей высоты заготовки по диаграмме $P - \Delta h$ в стадиях, предшествующих конечной, трудно из-за недостаточной точностью записи перемещения Δh . Для обеспечения строгой фиксации соответственных значений P и Δh в стадиях, предшествующих конечной, нужны экспериментальные средства, применение которых усложнит и увеличит трудоемкость эксперимента.

Для более широкого сравнения расчетных значений усилия с экспериментальными целесообразно рассчитать усилие для 6...12 стадий и построить расчетный график $P - \Delta h$, который затем сопоставить с машинной диаграммой.

Заключительный этап работы содержит анализ результатов эксперимента и расчета всех студентов бригады и формулирование выводов в соответствии с решаемыми задачами. В связи с этим в отчете каждого студента должны быть представлены в форме табл.4.2 и 4.3 сведения по всем заготовкам бригады.

При наличии обеих зон (скольжения и торможения) у нескольких заготовок следует построить график изменения отношения площади зоны торможения к площади зоны скольжения от величины осадки λ .

Чтобы предотвратить потери времени вследствие возможных ошибок измерения и расчета каждый студент должен предъявить преподавателю для промежуточного контроля следующие результаты работы (непосредственно после выполнения соответствующих ее этапов): размеры заготовки и ячеек сетки до деформации, а также расчет высоты, до которой необходимо осадить заготовку; размеры заготовки и ячеек сетки после деформации; расчет усилия деформирования и фактической величины осадки; диаграмму «усилие - перемещение пуансона», значения параметров деформации.

4.6. Оборудование, приборы, инструменты, приспособления, необходимые для выполнения эксперимента

1. Испытательная машина ГМС-50 или ИМЧ-30.
2. Приспособление для осадки.
3. Инструментальный измерительный микроскоп, микрометр, штангенциркуль, индикатор.
4. Приспособление для нанесения делительной сетки типографским способом.
5. Заготовки цилиндрические из разных металлов и сплавов с различными отношением диаметра к высоте.
6. Смазочные материалы (разного состава, в зависимости от марки материала заготовки), наждачная бумага, бензин, лак для покрытия поверхности заготовок с нанесенной сеткой, миллиметровая бумага.

4.7. Указания по составлению отчета

Отчет о работе должен содержать: задачи работы; условия и результаты эксперимента; эскиз приспособления для осадки; эскизы заготовки (с нанесенной делительной сеткой) до и после деформации; техническую характеристику испытательной машины; расчет усилия деформирования для конечной стадии осадки; результаты расчета параметров деформации для всех заготовок бригады (по форме табл.4.2); машинную диаграмму «усилие деформирования - перемещение пуансона»; таблицу параметров, характеризующих размеры зон скольжения и торможения, исходных данных для расчета усилия деформирования, расчетных и экспериментальных величин усилия в конце осадки всех заготовок бригады (по форме табл.4.3); анализ результатов расчета и эксперимента всех студентов бригады.

Таблица 4.3

Параметры, зон скольжения и торможения
и расчет усилий деформирования

Номер заготовки	H	D	$\frac{H}{D}$	h	$d_{ТВ}$	$d_{ТН}$	d_{max}	$\lambda_{факт}$	$(\varepsilon_w)_{cp}$	$d_{зт}$
	мм			мм ²				%		
1										
2										
Номер заготовки	$F_{зт}$	F_T	$F_{ск}$	$\frac{F_{зт}}{F_T}$	$\frac{F_{ск}}{F_T}$	μ	σ_i	P_p	$P_э$	Δ
	мм ²						кг/мм ² (МПа)	т (кН)		%
1										
2										

$F_T, F_{ск}, F_{зт}$ - площади торца после деформации, зоны скольжения и зоны торможения соответственно.

Отчет следует оформить в соответствии с указаниями, изложенными в приложении.

4.8. Вопросы для самоконтроля

1. К какой группе процессов обработки металлов давлением по классификации Г.А.Смирнова-Аляева отнесена свободная осадка плоскопараллельными плитами? Что характерно для процессов этой группы?

2. Чем вызвано искривление в процессе осадки боковой поверхности заготовки?

3. Какие допущения приняты при разработке методики расчета усилия осадки?

4. Какие факторы определяют величину усилия деформирования?

5. Объясните характер изменения усилия деформирования в процессе осадки.

6. Какие факторы определяют общий характер деформации заготовки? Укажите зоны максимальной и минимальной деформации.

7. Назовите факторы, определяющие неравномерность деформации по объему осаживаемой заготовки и ее контактной

поверхности.

8. Каков результат оценки достоверности формулы для расчета усилия осадки?

9. Охарактеризуйте закономерности изменения нормальных и касательных напряжений на контактной поверхности заготовки, осаживаемой плоскопараллельными плитами.

10. Каков характер изменения вдоль радиуса параметров деформации контактной поверхности по результатам выполненного в лабораторной работе исследования? Как влияет величина осадки на закономерности изменения параметров?

11. Какие практические навыки Вы приобрели (закрепили) в процессе выполнения лабораторной работы?

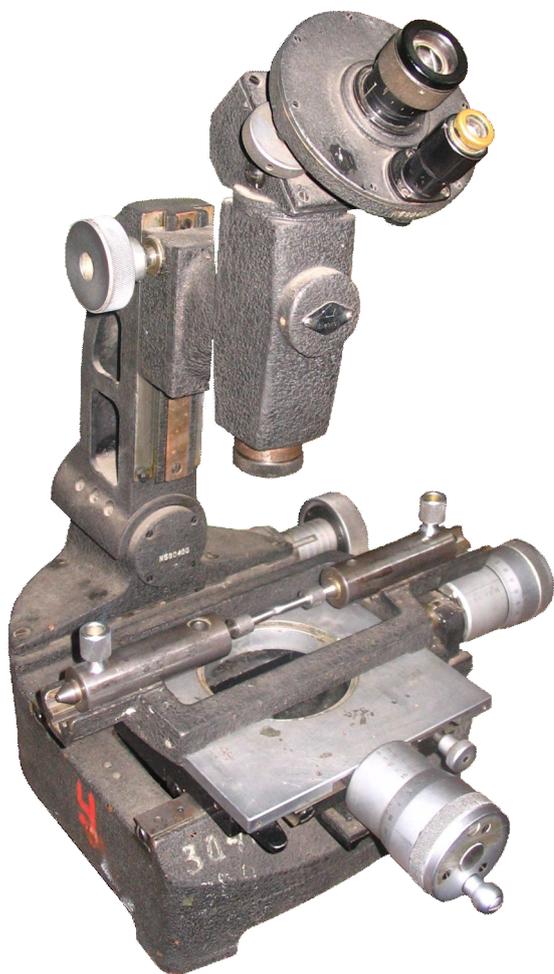


Рис.4.5. Микроскоп для измерения деформаций

Правила оформления отчета

Отчет о лабораторной работе следует оформлять, руководствуясь требованиями, предъявляемыми к отчетам о научно-исследовательских работах.

Структура

Структурными элементами отчета о лабораторной работе являются: титульный лист, содержание, основная часть, заключение и список использованных источников, приложения.

Содержание включает наименования всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование), заключение, список использованных источников и наименование приложений с указанием номеров страниц, с которых начинаются эти элементы отчета.

В отчете объемом не более 10 страниц содержание допускается не составлять.

В основной части отчета приводят данные, отражающие сущность, методику и основные результаты выполненной лабораторной работы.

Основная часть должна содержать: задачи работы, описание выбранной методики проведения исследования, обобщение и оценку результатов исследований.

В заключение делаются краткие выводы по результатам выполнений лабораторной работы или отдельных ее этапов.

Список использованных источников приводится в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-84. «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления».

В приложения могут быть включены: таблицы вспомогательных цифровых данных, протоколы испытаний, описание аппаратуры и приборов, применяемых при проведении экспериментов, измерений и испытаний, иллюстрации вспомогательного характера.

Общие требования

Страницы текста отчета и включенные в отчет иллюстрации и таблицы должны соответствовать формату А4.

Отчет о лабораторной работе может быть рукописным или выполненным любым печатным способом (на пишущей машинке или с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги формата А4 через полтора интервала).

Текст отчета следует располагать, соблюдая следующие размеры полей: правое - 15 мм, левое - 30 мм, верхнее и нижнее - 20 мм.

Основную часть отчета следует делить на разделы, подразделы и пункты. При делении текста отчета на пункты необходимо, чтобы каждый пункт содержал законченную информацию.

Разделы, подразделы, пункты следует нумеровать арабскими цифрами и записывать с абзацного отступа.

Разделы должны иметь порядковую нумерацию в пределах всего текста (пример - 1, 2 и т. д.).

Номер подраздела или пункта включает номер раздела и порядковый номер подраздела или пункта, разделенные точкой (пример - 1.1, 1.2 и т. д.).

После номера раздела, подраздела, пункта и подпункта в тексте точку не ставят.

Если раздел или подраздел имеет только один пункт, то нумеровать его не следует.

Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов.

Заголовки разделов, подразделов и пунктов следует печатать с абзацного отступа с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая.

Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Страницы отчета следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту отчета. Номер страницы проставляют в центре нижней части листа без точки.

Титульный лист включают в общую нумерацию страниц отчета. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, включают в общую нумерацию страниц отчета.

Каждый раздел отчета следует начинать с нового листа (страницы).

Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, компьютерные распечатки, диаграммы) следует располагать в отчете непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице. На все иллюстрации должны быть даны ссылки в отчете.

Иллюстрации, за исключением иллюстрации приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией.

Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой. Например, Рис. 1.1.

Иллюстрации, *при необходимости*, могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово «Рисунок» и наименование помещают после пояснительных данных и располагают следующим образом: Рис.1. Детали прибора.

Иллюстрации каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения. Например, Рисунок А.3.

При ссылках на иллюстрации следует писать «... в соответствии с рисунком 2» при сквозной нумерации и «... в соответствии с рисунком 1.2» при нумерации в пределах раздела.

Название таблицы, *при его наличии*, должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Номер таблицы следует помещать над таблицей справа, а ее название над таблицей во всю строку.

При переносе части таблицы название помещают только над первой частью таблицы, нижнюю горизонтальную черту, ограничивающую таблицу, не проводят.

Таблицу следует располагать в отчете непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице.

На все таблицы должны быть ссылки в отчете. При ссылке следует писать слово «табл.1» с указанием ее номера.

Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией или допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

Таблицы каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения.

Формулы следует выделять из текста в отдельную строку. Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Если уравнение не умещается в одну строку, то оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (-), умножения (x), деления (:), или других математических знаков, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак «X».

Пояснение значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле.

Формулы в отчете следует нумеровать порядковой нумерацией в пределах всего отчета арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке.

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках.

Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой, например (3.1).

Ссылки на использованные источники следует приводить в квадратных скобках. Сведения об источниках следует располагать в порядке появления ссылок на источники в тексте отчета и нумеровать арабскими цифрами без точки и печатать с абзацного отступа.

Приложения оформляют как продолжение отчета на последующих его листах. В тексте отчета на все приложения должны быть даны ссылки. Приложения располагают в порядке ссылок на них в тексте. Каждое приложение следует начинать с новой страницы с указанием наверху справа страницы слова «Приложение» и его номер и приложение должно иметь заголовок.

Допускается обозначение приложений буквами латинского алфавита, за исключением букв I и O.

В случае полного использования букв русского и латинского алфавитов допускается обозначать приложения арабскими цифрами.

Если в документе одно приложение, оно обозначается «Приложение А».

Приложения должны иметь общую с остальной частью документа сквозную нумерацию страниц.

Внутри пунктов могут быть приведены перечисления.

Перед каждым перечислением следует ставить дефис или, при необходимости ссылки в тексте документа на одно из перечислений, строчную букву (за исключением ё, з, о, г, ь, й, ы, ъ), после которой ставится скобка.

Для дальнейшей детализации перечислений необходимо использовать арабские цифры, после которых ставится скобка, а запись производится с абзацного отступа, как показано в примере.

Пример

а) _____ ;

б) _____ ;

1) _____ ;

2) _____ ;

в) _____ .

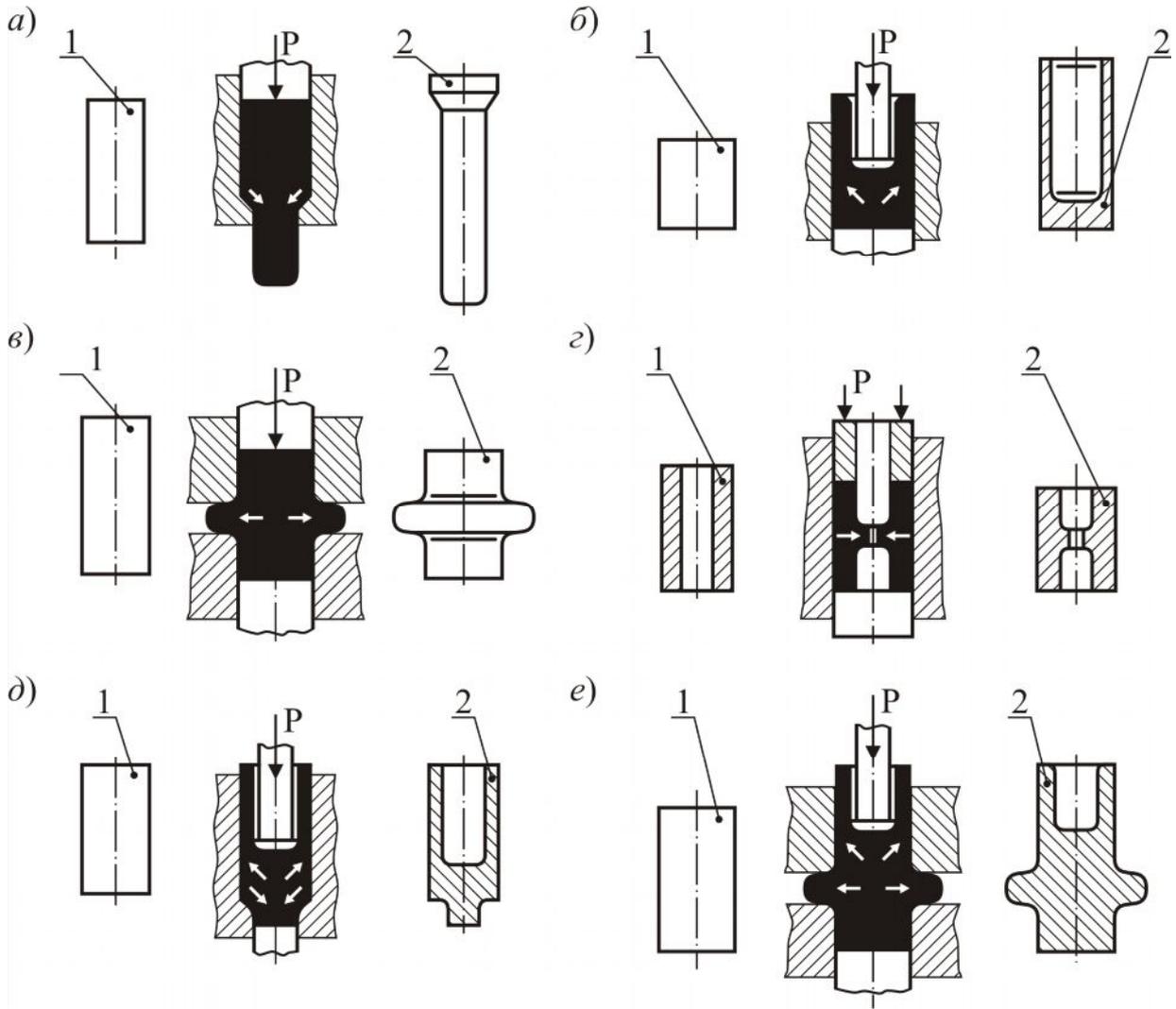


Рис.п.1

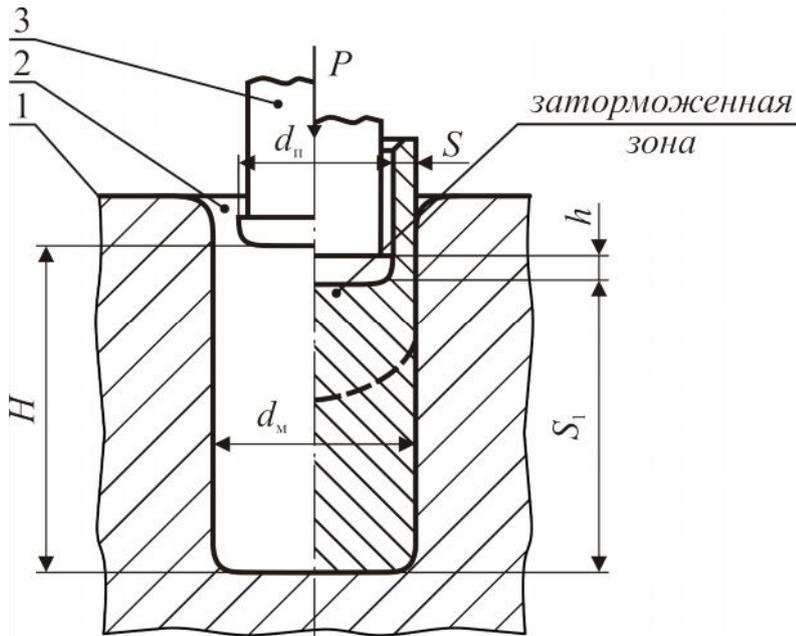


Рис.п.2

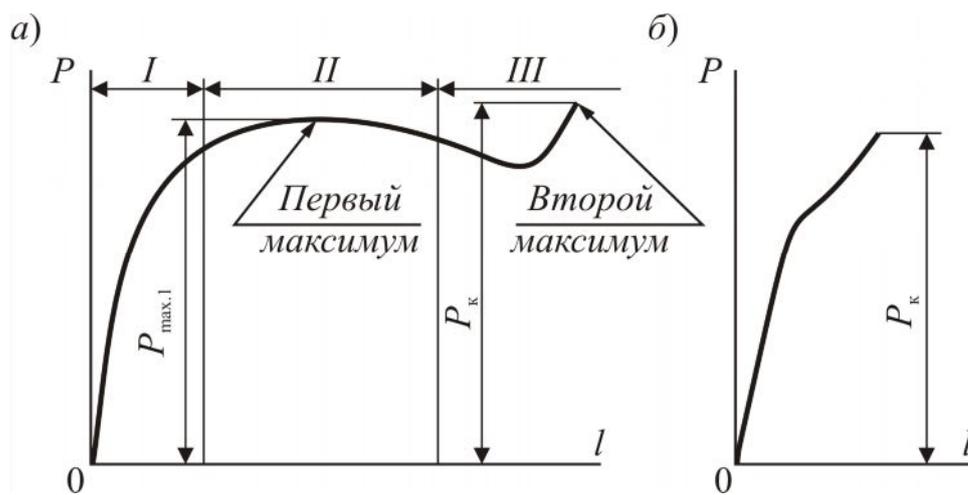


Рис.п.3

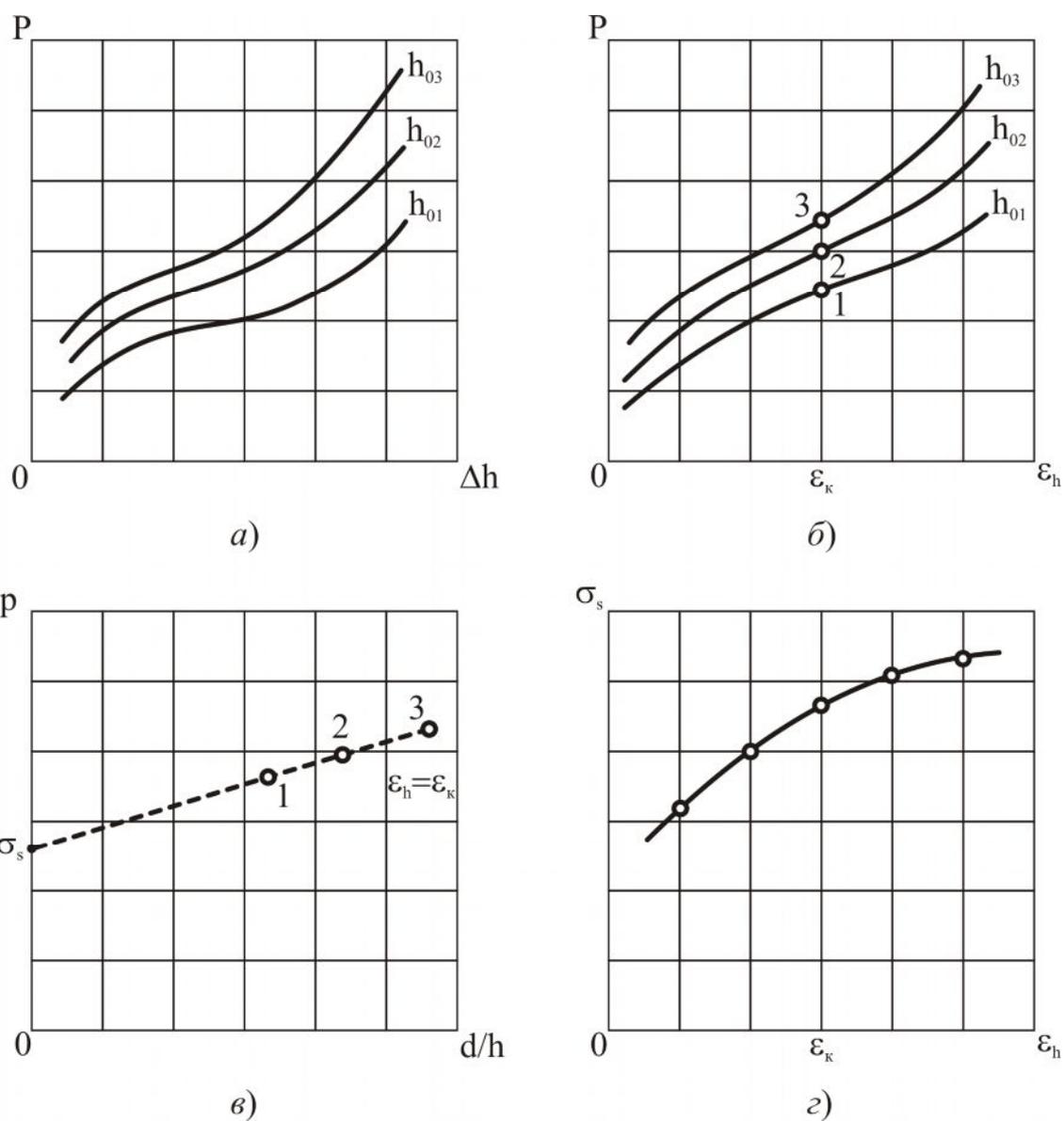


Рис.п.4

Литература

1. ГОСТ 7.32. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001.
2. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. М.: Издательство стандартов, 1985.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.
4. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972. 360 с.
5. ГОСТ 25.503-97. Метод испытания на сжатие. М.: Издательство стандартов, 1997.
6. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1961. 463 с.
7. Прудников М.И. Исследование в области теории холодного листовогогиба // Новое в кузнечно-штамповочных цехах Ленинграда. Л.: ЛДНТП, 1958. С.154-177.
8. Унксов Е.П. Инженерная теория пластичности. - М.: Машгиз, 1959. 328 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Определение функциональной зависимости "Интенсивность напряжений (σ_i) – интенсивность деформации (ϵ_i) металлов и сплавов по результатам испытания цилиндрических образцов растяжением	6
1.1. Задачи работы	6
1.2. Содержание и последовательность выполнения задания	6
1.3. Процесс растяжения цилиндрического образца	7
1.3.1. Основные зависимости	7
1.4. Аппроксимация зависимости $\sigma_i - \epsilon_i$	13
1.5. Характеристики механических свойств материала, определяемые по результатам испытания растяжением	15
1.6. Выполнение эксперимента и обработка его результатов	17
1.7. Оборудование, приборы, инструмент, образцы, материалы, необходимые для выполнения задания	21
1.8. Указания по составлению отчета	21
1.9. Вопросы для самоконтроля	21
2. Определение функциональной зависимости «Интенсивность напряжений (σ_i) – интенсивность деформации (ϵ_i)» металлов и сплавов по результатам испытания цилиндрических образцов сжатием	23
2.1. Задачи работы	23
2.2. Содержание и последовательность выполнения задания	23
2.3. Методики построения диаграммы $\sigma_i - \epsilon_i$	24
2.3.1. Испытание цилиндрических образцов на сжатие в соответствии с ГОСТ 25.503-97 [5]	25
2.3.2. Испытание цилиндрических образцов на сжатие по методике Г.А.Смирнова-Аляева [6]	26
2.4. Выполнение эксперимента и обработка его результатов	30
2.5. Оборудование, приборы, инструмент, образцы, материалы, необходимые для выполнения задания	31
2.6. Указания по составлению отчета	32
2.7. Вопросы для самоконтроля	32
3. Экспериментальное исследование деформированного и напряженного состояний наружной поверхности изгибаемой листовой заготовки	33
3.1. Задачи работы	33
3.2. Содержание и последовательность выполнения задания, исходные данные	33
3.3. Сведения из теории процесса изгиба листового материала. Формулы для расчета усилия деформирования	34

3.4. Методика исследования напряженно-деформированного состояния наружной поверхности заготовки	38
3.5. Выполнение эксперимента и обработка его результатов	42
3.6. Оборудование, приборы, инструменты, материалы, необходимые для выполнения эксперимента	44
3.7. Указания по составлению отчета	45
3.8. Вопросы для самоконтроля	45
4. Экспериментальное исследование деформированного состояния контактной поверхности осаживаемой цилиндрической заготовки.....	46
4.1. Задачи работы	47
4.2. Содержание и последовательность выполнения задания.....	47
4.3. Сведения из теории процесса свободной осадки плоскопараллельными плитами	48
4.4. Исследование деформации контактной поверхности заготовки	53
4.5. Выполнение эксперимента и обработка его результатов	57
4.6. Оборудование, приборы, инструменты, приспособления, необходимые для выполнения эксперимента	61
4.7. Указания по составлению отчета	61
4.8. Вопросы для самоконтроля	62
Приложение.....	64
Литература.....	71

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Составители: *Нестеров Николай Иванович,*
Тепляков Владимир Васильевич

Редактор *Г.М. Звягина*
Корректор *И.М. Киреенко*

Подписано в печать 9.03.07. Формат бумаги 60x84/16. Бумага документная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 4,375. Тираж 100 экз. Заказ № 221

Балтийский государственный технический университет

Типография БГТУ

190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1

