

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»

И. В. Агунович

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине для студентов
специальностей 1-36 01 05 «Машины и технология
обработки материалов давлением», 1-42 01 01
«Металлургическое производство
и материалобработка (по направлениям)»
специализации 1-42 01 01-02 01
«Обработка металлов давлением»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2019

УДК 621.77(075.8)
ББК 34.62я73
А27

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 10 от 05.12.2017 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Материаловедение в машиностроении»
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *И. Н. Степанкин*

Агунович, И. В.
А27 Теория обработки металлов давлением : практикум по выполнению лаборатор. работ по одноим. дисциплине для студентов специальностей 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением», 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Агунович. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 66 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-378-3.

Рассмотрены теоретические основы обработки металлов давлением: механизмы пластической деформации, кривые упрочнения, законы обработки металлов давлением, напряженное и деформированное состояние в точке нагруженного тела, влияние температуры и механической схемы деформации на пластические свойства металла, контактное трение.

Для студентов технических специальностей.

**УДК 621.1.016.4(075.8)
ББК 31.312я73**

ISBN 978-985-535-378-3

© Агунович И. В., 2019
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2019

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Работать на оборудовании студенты могут только под наблюдением преподавателя или учебного мастера. При выполнении работ группой студентов на оборудовании должен работать один человек, а остальные находиться на расстоянии не ближе 1 м.

При выполнении работ студент не должен отвлекаться и отвлекать других посторонними разговорами, при возникновении вопросов необходимо обратиться к преподавателю или учебному мастеру.

При работе в лабораторном корпусе необходимо быть внимательным к сигналам кранового оборудования; электроаппаратура должна находиться в закрытом шкафу, оборудование должно быть заземлено. Все измерения производятся при отключенном электропитании. При обнаружении неисправностей работа немедленно прекращается.

Общий инструктаж по технике безопасности осуществляется преподавателем в начале каждого семестра, а текущий – перед выполнением лабораторной работы. Проведение инструктажа регистрируется в кафедральном журнале по технике безопасности и подтверждается подписями студентов и преподавателя. Студенты, не получившие инструктаж по технике безопасности, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Перед началом работы студенты изучают вводную часть и соответствующие разделы настоящих методических указаний. Всю работу студенты выполняют самостоятельно в присутствии преподавателя или учебного мастера. Включение используемого оборудования в работу производится только учебным мастером.

По окончании работы студенты сдают используемые инструменты и методические указания, составляют индивидуальный отчет о полученных результатах.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

Формоизменение металла при обработке металлов давлением оценивается деформацией.

Различают деформации **линейные, угловые, поверхностные и объемные**. Эти деформации могут относиться как к элементарному объему, так и ко всему телу. Линейные деформации характеризуются изменением какого-либо одного размера; угловые деформации – изменением угла между какими-либо двумя линиями, проведенными в деформируемом теле; поверхностные – изменением площади какого-либо сечения или участка поверхности; объемные – изменением объема.

Указанные деформации, в свою очередь, могут быть разделены на **абсолютные, относительные и логарифмические**.

Абсолютные деформации выражают абсолютное изменение какого-либо линейного размера, углового размера, площади сечения или участка граничной поверхности элемента, выделенного в деформируемом теле, или всего тела:

$$\Delta a = a_1 - a_0.$$

Относительная деформация характеризуется изменением тех же величин. Обычно относительную деформацию определяют как отношение абсолютного изменения какого-либо параметра (абсолютной деформации) к первоначальному значению этого параметра:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_0}.$$

Логарифмическая деформация – это разновидность относительной деформации. Она представляет собой натуральный логарифм отношения измененного в результате деформирования размера к первоначальному размеру элемента тела или всего тела до начала деформирования:

$$\delta = \ln \frac{a_1}{a_0}.$$

Как правило, степень деформации определяется относительной деформацией, характеризующей общее изменение деформируемого тела. При неравномерном распределении деформаций в теле степень деформации дает представление о некоторой средней для всего тела

величине деформации, которую можно определять для любого, в том числе и для конечного момента деформирования.

В представленных лабораторных работах исследуется пластическая деформация, т. е. та, которая не исчезает после снятия внешних нагрузок.

Определение деформаций сводится к измерению абсолютной деформации и последующего его пересчета в требуемый вид деформации.

Приборы, применяемые для измерения размеров тела, зависят от вида измеряемого элемента и требуемой точности измерений. Так, измерить линейные размеры можно линейкой, штангенциркулем, микрометром, измерительной лупой и инструментальным микроскопом. Угловая деформация замеряется при помощи угломера, для измерения кривизны используется радиусомер.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СДВИГОВ

Продолжительность работы – 2 ч.

Цель работы: изучение внутрикristаллических линий сдвигов на деформированных образцах из малоуглеродистой стали.

Промышленный металл представляет собой конгломерат зерен-кристаллитов, т. е. имеет **поликристаллическое** строение. В каждом зерне наблюдается упорядоченное расположение атомов, соответствующее пространственной решетке данного металла, однако направление определенных кристаллографических плоскостей в различных зернах может быть различно в силу различных условий кристаллизации и последующей обработки. В отличие от поликристалла тела, для всего объема которых характерно постоянство направления определенных кристаллографических плоскостей в пространстве, называют **монокристаллами**.

На рис. 1.1 показано строение моно- и поликристалла.

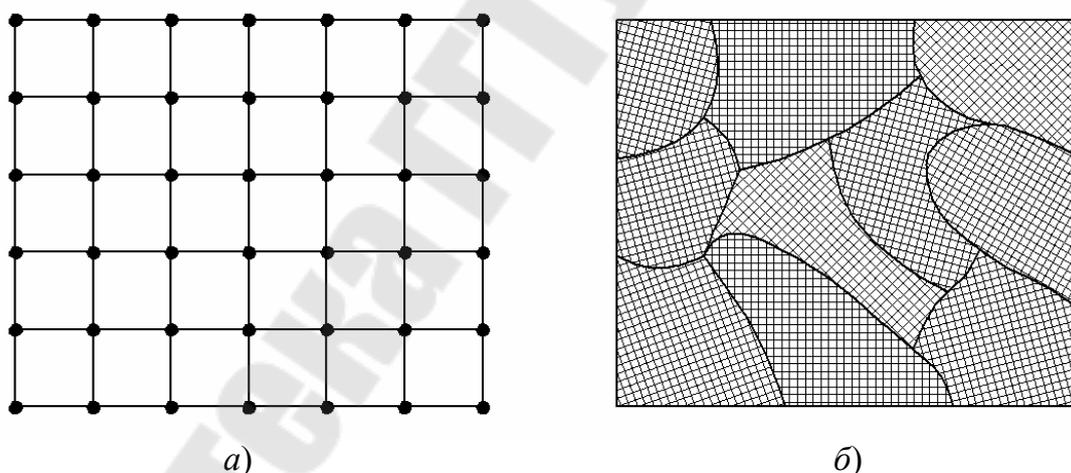


Рис. 1.1. Моно- (а) и поликристалл (б)

Чтобы понять природу пластической деформации поликристаллического тела, вначале необходимо рассмотреть природу пластической деформации монокристалла.

Пластическая деформация монокристалла осуществляется за счет двух основных механизмов: скольжения и двойникования.

Скольжение – процесс пластической деформации монокристалла, при котором одна его часть сдвигается относительно другой

части по определенным кристаллографическим плоскостям, называемым плоскостями скольжения. В промежутках между этими слоями пластическая деформация отсутствует. Линия пересечения плоскости скольжения с наружной поверхностью кристалла называется **линией скольжения (линией сдвига)**.

Основная закономерность пластической деформации состоит в том, что скольжение происходит по плоскостям, наиболее плотно упакованным атомами, а в этих плоскостях – по направлениям, наиболее упакованным атомами. Плоскости скольжения и направления скольжения образуют **системы скольжения**.

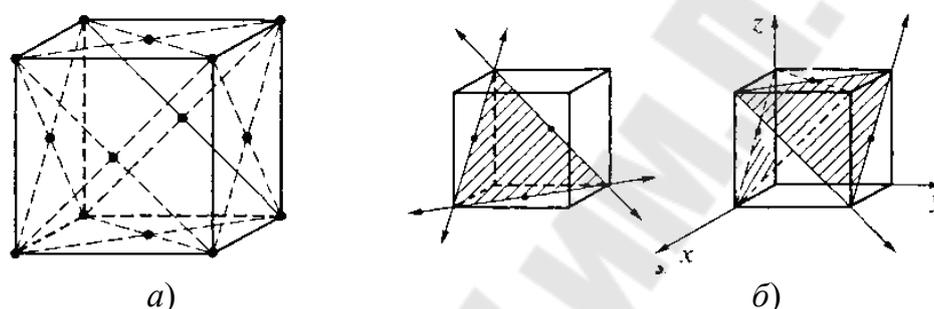


Рис. 1.2. Гранецентрированная кубическая решетка (а) и октаэдрическая плоскость скольжения (б)

На рис. 1.2 показана гранецентрированная кубическая решетка (алюминий, медь, свинец, железо, золото, серебро, никель, платина и другие металлы). В ней можно провести четыре плоскости сдвига (октаэдрические плоскости), наиболее плотно упакованные атомами. В каждой плоскости есть три направления скольжения, т. е. монокристалл с гранецентрированной кубической решеткой имеет 12 систем скольжения.

Приведенные выше сведения о системах скольжения относятся к комнатной температуре. При повышенных температурах вступают в действие и другие системы скольжения.

Скольжение вызывается воздействием сдвигающего (касательного) напряжения. Оно начинается, когда касательное напряжение достигает некоторого значения, называемого **критическим сдвигающим напряжением**. Это напряжение по своей величине превышает предел текучести материала, и *при данной температуре и скорости деформации является постоянной величиной, не зависящей от ориентировки плоскостей скольжения относительно действующих на тело сил*. Схема начала скольжения показана на рис. 1.3.

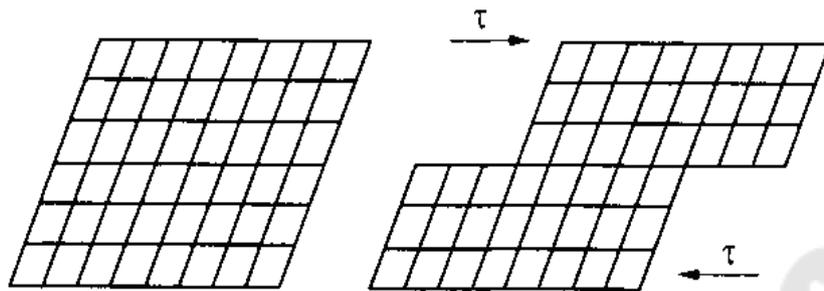


Рис. 1.3. Схема начала скольжения

Двойникование – такой механизм деформации, при котором решетка деформированной части кристалла является зеркальным отображением решетки недеформированной части (рис. 1.4).

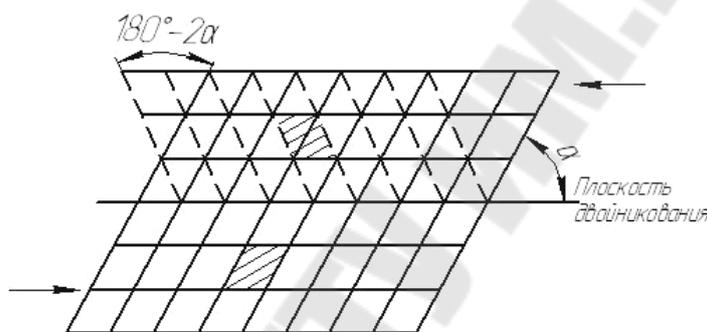


Рис. 1.4. Схема двойникования

Двойникованием может быть получена незначительная степень деформации, оно значительно редко происходит при статическом нагружении и значительно чаще при деформировании ударом. Двойникование может сопутствовать деформации скольжением.

Расчеты показывают, что для сдвига плоскостей одна за другой кристаллов цинка, по всему сечению требовалось бы создать сдвигающее напряжение (критическое сдвигающее напряжение) около 3500 МПа. Действительное (экспериментальное) критическое сдвигающее напряжение имеет значение около 1 МПа. Для объяснения этого явления была предложена теория дислокаций. Под **дислокацией** понимается линейный дефект кристаллической решетки, связанный с возникновением дополнительной полуплоскости атомов (рис. 1.5), так как это линия, вдоль которой нарушены связи между соседними атомами в решетке, и число ближайших соседей каждого атома не соответствует координатному числу. Сдвиг в кристалле происходит за счет движения дислокации по плоскости скольжения. С этой точки зрения мож-

но объяснить низкое значение критического сдвигающего напряжения, так как сила, требующаяся для смещения дополнительной атомной полуплоскости в направлении скольжения, должна быть намного меньше силы, необходимой для сдвига двух жестких частей монокристалла относительно друг друга.

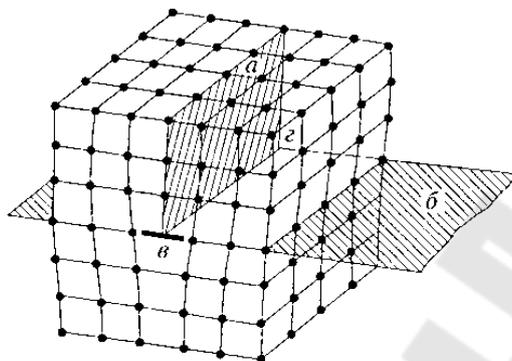


Рис. 1.5. Схема кристаллической решетки с краевой дислокацией:
a – дополнительная полуплоскость (экстраплоскость);
b – плоскость скольжения; *z* – краевая дислокация

Основными наиболее распространенными типами дислокаций являются **краевая** и **винтовая** дислокации.

Пластическая деформация поликристалла осуществляется двумя путями:

- внутризеренная деформация (скольжение, двойникование);
- межзеренная деформация (поворот зерен, сдвиги, проскальзывание).

При воздействии на материал внешней нагрузки деформация в зернах носит в основном сдвиговой характер. Она сопровождается поворотом зерен и увеличением их площади в плоскости шлифа за счет выхода на поверхность новых объемов металла в линиях сдвига. Сдвиговая деформация начинается в отдельных зернах, подверженных наибольшему напряжению и имеющих наиболее благоприятную для начала сдвига ориентацию. Чаще всего такими являются крупные и неравноосные зерна. Плоскости скольжения их совпадают с плоскостями сдвига.

Изменение контуров зерна, в котором возникла деформация, вызывает начало сдвига в соседних зернах. Образуются цепочки зерен с линиями сдвигов. Эти цепочки расположены под углом 90° к направлению приложенного усилия. С увеличением деформации выше «кри-

тической» линии сдвига образуются в большинстве зерен и при деформации около 15 % наблюдаются во всех зернах.

Материалы, инструмент, оборудование. Для изучения внутрикристаллических линий сдвигов применяются образцы, имеющие форму куба со стороной $a = 10$ мм из отожженной малоуглеродистой стали ($C = 0,07-0,12$ %).

Для выполнения работы необходимо иметь: измерительную линейку; напильник; тиски; 3–5-процентный раствор азотной или пикриновой кислоты; спирт; вату; фильтровальную бумагу; полировальный круг; наждачную бумагу; микроскоп.

Выполнение работы. Одна из поверхностей образца полируется сначала на бумаге, а затем на полировальном круге до зеркального блеска. Полирование производится до тех пор, пока на поверхности шлифа совершенно не будет рисок. Отполированная поверхность промывается водой, а затем спиртом, протирается ватой, протравливается слабым (3–5-процентным) раствором азотной или пикриновой кислоты и снова промывается спиртом и просушивается фильтровальной бумагой.

Протравленный шлиф рассматривается под микроскопом, при этом должны обнаружиться крупные зерна феррита. Поверхность зерен чистая, без каких-либо признаков линий скольжения (рис. 1.6). Травление необходимо производить весьма тщательно. Несмытая кислота, а также плохо просушенный шлиф не дают возможности выявить под микроскопом микроструктуру. Иногда для лучшего выявления структуры следует шлиф протравить два раза с промежуточной шлифовкой на полировальном круге.

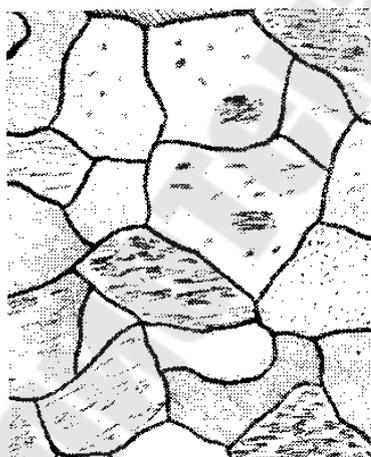


Рис. 1.6. Микроструктура малоуглеродистой стали до деформации



Рис. 1.7. Внутрикристаллические линии сдвигов в образце из малоуглеродистой стали после деформации

Выявленную микроструктуру необходимо зарисовать в тетради.

После зарисовки структуры снимаются размеры образца, затем образец деформируется путем сжатия в тисках. Снимаются размеры образца после деформации. Рассчитывается степень деформации. Отполированная и протравленная поверхность не должна соприкасаться с губками тисков. После деформирования отполированную и протравленную поверхность образца снова рассмотреть под микроскопом и зарисовать структуру.

В отдельных зернах обнаружатся линии сдвигов в виде ряда линий, параллельных друг другу или пересекающихся соответственно кристаллографическим направлениям в каждом отдельном зерне (рис. 1.7).

Следует учесть, что сильно переходить предел текучести при деформировании образца не рекомендуется, так как можно получить большое количество линий сдвигов и выявить отдельные линии будет невозможно.

В заключение сделать выводы и записать их в тетради.

Контрольные вопросы

1. Обоснуйте различия между поликристаллом и монокристаллом.
2. Механизмы пластической деформации монокристалла.
3. Что такое линии скольжения? Причины возникновения.
4. Что такое система скольжения.
5. Где образуются плоскости скольжения?
6. Дислокация. Виды дислокаций.
7. Роль критического сдвигающего касательного напряжения при деформации. Укажите, какие параметры на него влияют.

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ЛИНИЙ ТЕКУЧЕСТИ

Продолжительность работы – 2 ч.

Цель работы: выявление линий текучести на образцах (при растяжении) путем непосредственного наблюдения на деформированных поверхностях.

Известно, что пластическая деформация поликристалла осуществляется двумя путями:

- внутризеренная деформация (скольжение, двойникование);
- межзеренная деформация (поворот зерен, сдвиги, проскальзывание).

Внутризеренная деформация поликристалла подчиняется тем же механизмам, что и деформация в монокристалле, но отличается воздействием зерен друг на друга. Деформация происходит сложнее, чем в монокристалле. Различие в характере деформирования моно- и поликристаллов определяется неоднородностью напряженного состояния зерен поликристалла, различием в ориентировке и величине зерен, их свойств и состояния границ.

Металл, находящийся в напряженном состоянии, при любом виде нагружения всегда испытывает нормальные σ и касательные τ напряжения. Например, под действием осевых растягивающих сил P (рис. 2.1) в плоскости $a-b$ (площадь F_0) возникают максимальные растягивающие напряжения $\sigma_0 = P / F_0$; в любом сечении $c-d$ (площадь F_1), проведенном под углом α к сечению $a-b$, действует напряжение $\sigma_1 = P / F_1$; так как $F_1 = F_0 / \cos \alpha$, то $\sigma_1 = \sigma_0 \cdot \cos \alpha$. Разлагая это напряжение на составляющие, получим, что в плоскости $c-d$ действует нормальное (к плоскости) напряжение $\sigma_n = \sigma_0 \cdot \cos^2 \alpha$; касательное (в плоскости) напряжение $\tau = \sigma_0 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = 0,5 \cdot \sigma_0 (\sin 2\alpha)$.

Максимальное значение нормальное напряжение будет иметь при $\sigma = 0^\circ$, т. е. $\sigma_{n \max} = \sigma_0$; касательное напряжение максимальное значение будет иметь при $\alpha = 45^\circ$. В этом случае $\tau_{\max} = \sigma_0 / 2$.

Нормальные напряжения могут вызывать только упругую деформацию, пластическая деформация происходит только под действием касательных напряжений, достаточных по величине для необратимого перемещения атомов в кристаллической решетке.

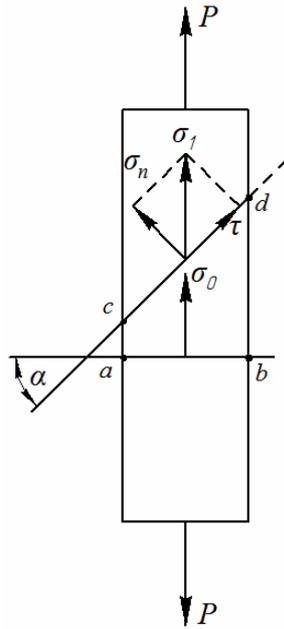


Рис. 2.1. Схема напряжений при растяжении

В первую очередь, пластическая деформация возникает в тех зернах, где наиболее благоприятно ориентированы плоскости скольжения, т. е. где плоскости скольжения совпадают с площадками действия максимальных по величине касательных напряжений (рис. 2.2, зерна I). Остальные зерна – наименее благоприятно ориентированные (рис. 2.2, зерна II и III) – деформируются упруго и могут получить лишь относительное смещение. Внешним проявлением групповых сдвигов в наиболее благоприятно ориентированных зернах являются **линии текучести (линии Чернова–Людерса)**, которые наблюдаются на поверхности тела.

По мере увеличения деформирующих сил касательные напряжения, действующие в менее благоприятно ориентированных плоскостях скольжения, достигают величины, необходимой для пластической деформации. Постепенно пластическая деформация охватывает все возрастающее количество зерен поликристалла. Напряжение, соответствующее включению в пластическую деформацию преобладающего большинства зерен металла, является **пределом текучести**.

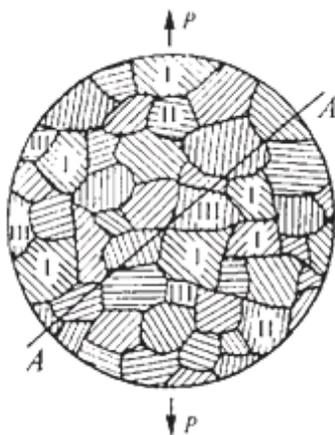


Рис. 2.2. Различная ориентировка плоскостей скольжения в зернах (I–III) поликристалла

Межзеренная деформация играет преобладающую роль в образовании площадки текучести на кривой растяжения. Дальнейшее увеличение деформации выше предела текучести приводит к вытягиванию зерен в направлении наибольшего течения металла. Данная ориентировка зерен называется **полосчатостью микроструктуры**. Одновременно с этим идет процесс поворота кристаллографических осей отдельных зерен в пространстве. По мере накопления пластической деформации разница в направлениях кристаллографических осей отдельных зерен уменьшается, а плоскости скольжения стремятся совместиться с направлениями наиболее интенсивного течения металла. Возникает так называемая **текстура деформации**, которая приводит к анизотропии свойств металла.

О способности металла образовывать при деформации линии текучести судят по наличию площадки текучести на кривой растяжения. Заделать или удалить уже образовавшиеся линии текучести не всегда удается. Изделия с таким дефектом бракуются.

Для предотвращения образования линий текучести листы малоуглеродистой отожженной стали перед штамповкой подвергают небольшой деформации (0,5–3,0 %) путем прокатки с малыми обжатиями (дрессировки), правки на роликовой машине или растяжения. Наиболее эффективным мероприятием для предотвращения образования линий текучести является дрессировка. В результате такой обработки на кривой растяжения исчезает площадка текучести и при штамповке не образуются линии текучести. При растяжении металла после долгого хранения на кривой растяжения вновь возникает площадка текучести, а при штамповке – линии текучести.

Материалы, инструмент, оборудование. Для выполнения работы применяются разрывные образцы из малоуглеродистой стали, отожженной при температуре 930 °С, 30–50-тонная испытательная машина; нагревательная печь; измерительная линейка; напильник; наждачная бумага; ножовка; соль хлорной меди.

Выполнение работы. Для исследования берется разрывной образец, поверхность которого полируется до зеркального блеска; он нагревается в печи до температуры 200–300 °С. После охлаждения образец подвергается растяжению на разрывной машине при скорости деформирования около 5 мм/мин и напряжении, несколько превышающем предел текучести. Во время деформирования проводится наблюдение за линиями текучести, которые появляются в виде пересекающихся линий, направленных к оси образца примерно под углом 45° (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Линии текучести на стальном образце, подвергнутом растяжению

В целях лучшего выявления линий текучести образцы после растяжения следует слегка отшлифовать наждачной бумагой. В результате записывается нагрузка машины, при которой на поверхности образца появляются линии текучести, степень деформации образца и зарисовывается в тетради образец с линиями текучести.

Контрольные вопросы

1. Какие напряжения возникают в металле при деформации?
2. Пластическая деформация поликристалла.
3. Что такое линии текучести?
4. Что называется полосчатостью микроструктуры?
5. Что такое текстура деформации?
6. Как можно предотвратить появление линий текучести на изделиях?

Лабораторная работа № 3

ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ИСТИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕФОРМИРУЕМОМ МЕТАЛЛЕ

Продолжительность работы – 4 ч.

Цель работы: ознакомление с методикой определения показателей механических свойств металлов при испытаниях на растяжение, построение кривой и ориентировочной прямой упрочнения.

Пластическая деформация приводит к значительному изменению механических, физических и химических свойств металла. В процессе деформирования с увеличением степени деформации растут все *показатели сопротивления деформированию*, а именно, предел текучести, прочности, предел пропорциональности, упругости. Увеличивается также твердость металла. Одновременно уменьшаются *показатели пластичности* металла, к которым относятся: относительное удлинение, сужение, сжатие, ударная вязкость. В процессе пластической деформации увеличивается электросопротивление, уменьшается сопротивление коррозии и теплопроводность. Таким образом, совокупность явлений, связанных с изменением механических и физико-химических свойств металла в процессе пластической деформации, называется **упрочнением** или **наклепом**.

Основными причинами упрочнения металла являются:

- образование пространственной сетки от пересечения плоскостей скольжения друг с другом, где имеет место скопление дислокаций;
- образование стенок дислокации на границах зерен, которые являются потенциальными барьерами для стока дислокаций;
- блокообразование и искривление плоскостей скольжения;
- выделение субмикроскопических частиц по плоскостям скольжения и распад твердых растворов с выделением дисперсных частиц в результате повышения температуры под действием пластической деформации.

На практике для определения некоторых показателей механических свойств металлов строят кривые упрочнения. По **кривым упрочнения** устанавливается зависимость истинных напряжений в металле от степени его деформации. **Истинным напряжением** называется отношение деформирующего усилия к наименьшей площади поперечного сечения образца в данный момент деформации. Истинное напряжение, определяемое при растяжении, в теории обработки металлов давлением называют истинным сопротивлением.

Так как сопротивление деформации зависит от температурно-скоростных условий деформирования, то кривые упрочнения для каждого металла и сплава строят применительно к конкретным температурно-скоростным условиям деформирования.

В зависимости от характеристики деформации различают несколько видов кривых упрочнения:

1. Зависимость истинного напряжения от относительного удлинения $\sigma = f(\delta)$.

2. Зависимость истинного напряжения от относительного сужения $\sigma = f(\psi)$.

3. Зависимость истинного напряжения от логарифмической (аддитивной) деформации $\sigma = f(\varphi)$.

4. Зависимость максимальных истинных касательных напряжений τ от максимальной деформации сдвига.

5. Зависимость истинных октаэдрических касательных напряжений от октаэдрических деформаций.

Наиболее подходящими для построения кривых упрочнения являются данные, полученные из испытания на растяжение или сжатие (осадку). Построение участка кривой упрочнения показано на рис. 3.1 и 3.2.

При испытаниях на растяжение линейное напряженное состояние в образце имеет место до момента образования шейки, после чего равномерность деформации нарушается и напряженное состояние в месте сосредоточенной деформации становится объемным.

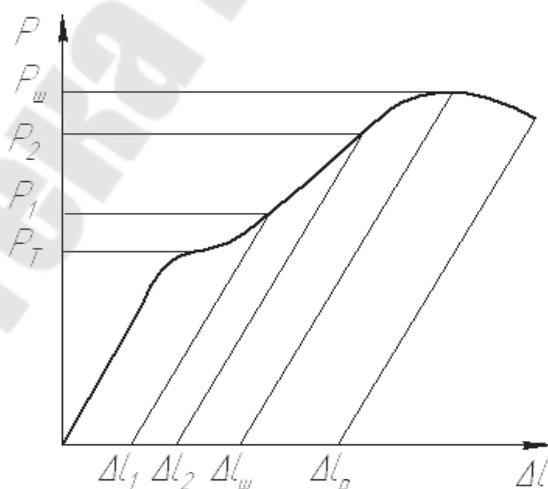


Рис. 3.1. Индикаторная диаграмма для построения кривой упрочнения

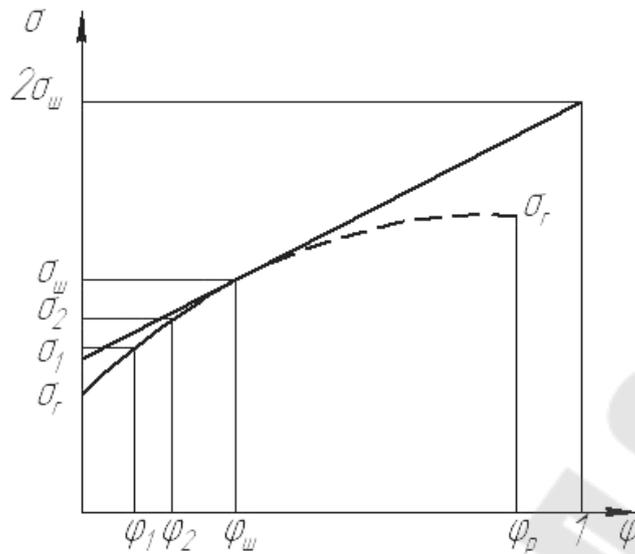


Рис. 3.2. Кривая упрочнения и ориентировочная прямая упрочнения

Поэтому построение кривой упрочнения при деформациях, превышающих начало образования шейки, возможно лишь с известными приближениями:

$$\delta_x = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_x - l_0}{l_0} \text{ — относительное удлинение;}$$

$$\psi_x = \frac{\Delta F}{F_0} = \frac{F_0 - F_x}{F_0} \text{ — относительное сужение;}$$

$$\sigma_x = \frac{P_x}{F_x} \text{ — истинное напряжение,}$$

где l_0 , F_0 — начальная длина образца и площадь поперечного сечения образца; l_x , F_x — длина образца и площадь поперечного сечения в данный момент деформации; P_x — усилие в данный момент деформации.

Из условия постоянства объемов при пластической деформации:

$$F_0 l_0 = F_x (l_0 + \Delta l)$$

можно найти связь между площадью поперечного сечения образца в данный момент деформации и площадью исходного сечения образца:

$$F_x = \frac{F_0 l_0}{l_0 + \Delta l} = \frac{F_0 l_0}{l_0 \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)} = \frac{F_0}{1 + \delta_x}.$$

Начальной ординатой кривой является отрезок, равный пределу текучести, который определяется по индикаторной диаграмме (рис. 3.1 и 3.2). Конечной ординатой указанного участка кривой является отрезок, равный напряжению в момент образования шейки. Промежуточные определяют при помощи приведенных выше формул: для этого на индикаторной диаграмме выбирают несколько произвольных точек и определяют для них действующие усилия P_x и абсолютные деформации Δl_x , по которым затем последовательно вычисляют относительное удлинение δ_x , сужение ψ_x и площадь поперечного сечения F_x .

Сложнее обстоит дело с построением второго участка кривой, так как после появления шейки начинается сосредоточенная деформация. Точно можно нанести только одну точку этого участка, определяющую напряжение и деформацию в момент разрушения (деформация определяется замером диаметра образца в месте разрушения). Промежуточные точки могут быть построены путем непосредственного фиксирования диаметра образца в месте шейки в процессе деформации, что весьма затруднительно.

На основании изучения свойств кривой упрочнения установлено, что с достаточной степенью приближения она может быть заменена касательной. Касательная к кривой упрочнения в точке, соответствующей моменту образования шейки, называется **ориентировочной прямой упрочнения**. Кривые упрочнения имеют свои свойства, которые характеризуются величинами отрезков, отсекаемых этой ориентировочной прямой на осях координат.

Свойства кривой упрочнения 1-го рода ($\sigma = f(\delta)$): касательная к кривой в точке появления шейки (точка с координатами $\delta_{ш}$, $\sigma_{ш}$ (рис. 3.3)) отсекает:

- на оси абсцисс влево от начала координат отрезок, равный единице относительного удлинения $\delta = 1$;
- на нулевой ординате – отрезок, определяющий истинное напряжение, равное по величине временному сопротивлению $\sigma = \sigma_b$;
- на ординате, отвечающей единице относительного удлинения, отрезок, равный $2\sigma_b$.

Свойства кривой упрочнения 2-го рода ($\sigma = f(\psi)$): касательная к кривой в точке появления шейки отсекает (рис. 3.4):

- на ординате, соответствующей величине $\psi = 1$, отрезок, равный $2\sigma_{ш}$;

- на оси ординат отрезок σ_0 , который называется экстраполированным пределом (напряжением) текучести;
 - на отрицательной абсциссе отрезок, равный $1 - 2\psi_{ш}$.
- Разность $2\sigma_{ш} - \sigma_0$ называют модулем упрочнения.

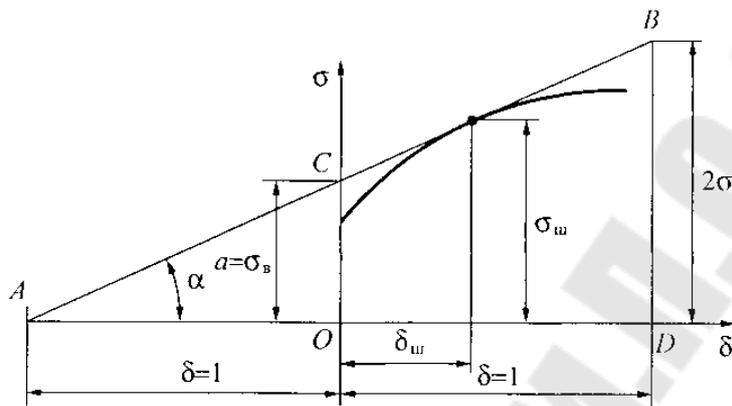


Рис. 3.3. Кривая упрочнения первого рода

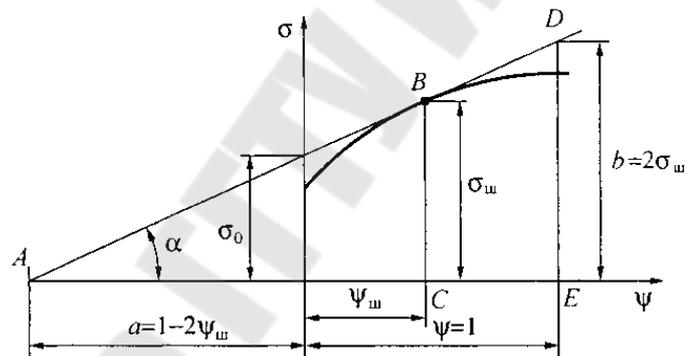


Рис. 3.4. Кривая упрочнения второго рода

Материалы, инструмент, оборудование. Для испытаний используют образцы, размеры которых показаны на рис. 3.5. Материал образца – малоуглеродистая сталь. Растяжение образцов производят на универсальной испытательной машине. Замер образца производится штангенциркулем и микрометром.

Выполнение работы. Образец для испытаний на растяжение приведен на рис. 3.5. Перед началом испытаний необходимо зарисовать образец в отчет, сняв предварительно его истинные размеры.

На универсальной испытательной машине производится растяжение образца с записью индикаторной диаграммы. Температура испытаний – комнатная.

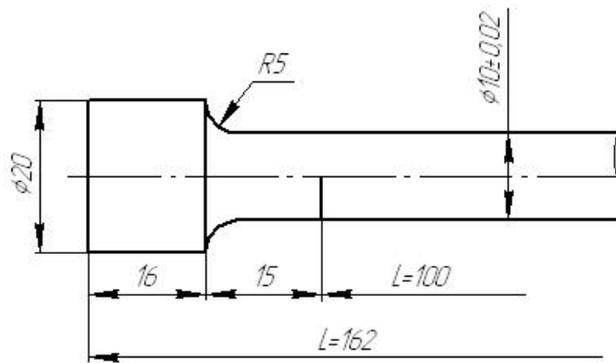


Рис. 3.5. Образец для испытаний на растяжение

По результатам испытаний определяют следующие величины:

1. Предел текучести:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}.$$

2. Относительное удлинение ε в момент образования шейки и при значениях произвольно выбранных усилий P_1 и P_2 .

3. Относительное сужение площади поперечного сечения при тех же, что и для предыдущего случая, условиях.

4. Истинные напряжения в момент образования шейки и при усилиях деформации P_1 и P_2 :

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш}}}{F_{\text{ш}}}; \quad \sigma_1 = \frac{P_1}{F_1}; \quad \sigma_2 = \frac{P_2}{F_2}.$$

Напряжение в момент разрушения образца.

На основании полученных расчетных данных строят кривую истинных напряжений, ориентировочную прямую упрочнения и показывают на графике напряжение и деформацию в момент разрушения образца.

Контрольные вопросы

1. Что называется упрочнением (наклепом)?
2. Причины упрочнения.
3. Что такое истинное напряжение?
4. Какие виды кривых упрочнения Вы знаете?
5. Построение кривой упрочнения.
6. Свойства кривых упрочнения 1-го и 2-го рода.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА ДЕФОРМИРОВАНИЮ

Продолжительность работы – 4 ч.

Цель работы: изучение влияния температуры на механические свойства деформируемого металла; построение температурной диаграммы пластичности.

Пластичность металла определяется способностью его к деформированию без разрушения. Строгая и точная оценка пластичности металлов представляет определенные трудности. Трудность заключается в том, что данное свойство зависит от многих факторов: структурного фактора, температурно-скоростного и механического.

Структурный фактор включает химический состав сплава, тип кристаллографической решетки основных компонентов, характер и количество примесей, величину и форму кристаллитов.

Температурно-скоростной фактор определяется температурой и скоростью деформирования. В частности, от температуры зависят такие нежелательные явления, как перегрев и пережог металла, изменение фазового состава и т. п. Скорость деформирования должна соответствовать структуре деформируемого металла.

Механический фактор определяется механической схемой деформации.

Для оценки пластичности деформируемых металлов применяются следующие показатели: относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость.

Температура оказывает большое влияние на пластичность материала. Повышение температуры приводит к увеличению тепловой подвижности атомов кристаллической решетки металлов и появлению дополнительных систем скольжения при деформировании. Также с увеличением температуры возрастает пластичность межкристаллитных прослоек с повышенным содержанием примесей. С нагревом до температуры горячего деформирования прочность этих прослоек уменьшается более интенсивно, чем прочность зерен, и доля межкристаллитной деформации в общей деформации металла увеличивается. Одновременно уменьшается хрупкость прослоек, а следовательно, и образование в них микротрещин.

Снижение вероятности образования микротрещин объясняется также возможностью их «залечивания» в процессе деформирования благодаря диффузионным процессам межзеренной термической пластичности.

Поэтому, как правило, при повышении температуры все показатели прочности, характеризующие сопротивление деформации, снижаются, а характеристики пластичности увеличиваются. Однако изменение указанных показателей происходит не монотонно (рис. 4.1).

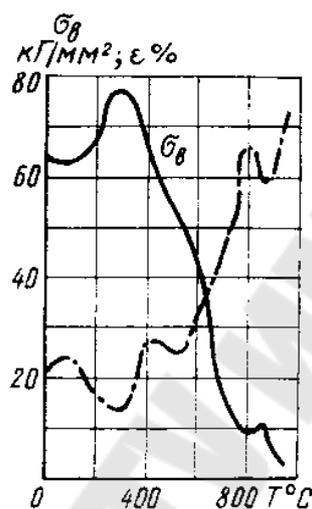


Рис. 4.1. График зависимости относительного удлинения ϵ и сопротивления деформированию $\sigma_{\text{в}}$ от температуры для углеродистой стали

Закон Курнакова: изменение механических и технологических показателей с изменением температуры подчиняется экспоненциальной зависимости для материалов, не имеющих превращений в данном интервале температур, и претерпевает экстремум в противном случае.

Показатели пластичности и сопротивления деформированию определяют испытаниями при различных температурах: от комнатной до высоких. На каждую точку испытывают не менее трех образцов. Такие испытания позволяют построить диаграммы пластичности и сопротивления деформации в виде зависимостей этих характеристик от температуры (рис. 4.1). Испытания проводят при статическом и динамическом нагружении для характеристики влияния скорости деформации на механические свойства металла.

Из всех температурных диаграмм пластичности наиболее просто экспериментально получить диаграмму изменения ударной вязкости

(метод ударного изгиба), которую оценивают отношением работы при ударе, затраченной на излом специального образца с надрезом, к площади поперечного сечения образца в месте надреза до испытания. Поскольку ударная вязкость определяется работой, затраченной на деформирование образца до разрушения, она является сложной характеристикой как пластичности, так и сопротивления деформации в процессе испытания. Ударная вязкость может быть одинаковой при испытании двух металлов разной пластичности, если металл менее пластичный обладает большим сопротивлением деформации, чем другой, и, наоборот.

Метод испытаний на ударную вязкость отличается простотой. По стандартному образцу с надрезом посередине длины, установленному на две опоры, наносится удар, приводящий к его разрушению (или изгибу). Удар ножа маятника должен приходиться на противоположную сторону образца против надреза. Испытания выполняют на маятниковых (рис. 4.2) или ротационных копрах.

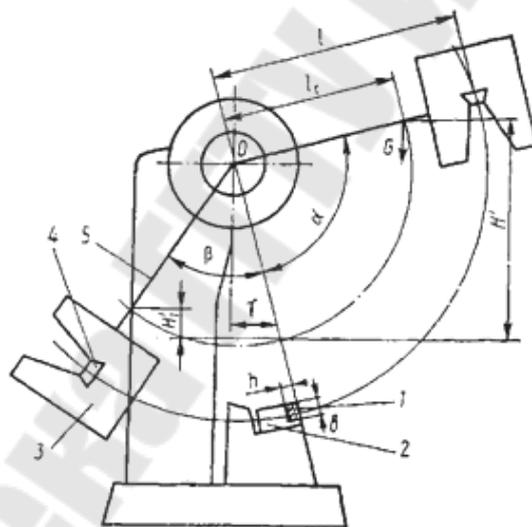


Рис. 4.2. Схема испытания на маятниковом копре:

1 – испытуемый образец; 2 – опоры; 3 – молот; 4 – нож;
5 – штанга; l – расстояние до центра удара; l_c – расстояние до центра тяжести; γ – угол выноса опор

Маятник массой m поднимается на некоторую высоту H' . При падении к моменту удара по образцу он поворачивается на угол α (угол зарядки маятника), а его кинетическая энергия равна gmH' . После разрушения образца сечением $b \times h$ маятник поворачивается на меньший угол β (угол взлета маятника) и поднимается на меньшую

высоту H'_1 . При этом после разрушения образца энергия маятника составит gmH'_1 , а работа, затраченная на разрушение образца (или его изгиб), равна разности кинетических энергий маятника до и после удара:

$$A = gm(H' - H'_1).$$

Работу удара определяют после разрушения образца по секторной шкале, градуированной в единицах работы.

На типовой температурной диаграмме пластичности ($a_k = f(t)$) можно отметить несколько характерных температурных зон пониженной пластичности (провалов пластичности):

– **зону хладноломкости**, обусловленной пониженной тепловой подвижностью атомов;

– **зону синеломкости** (для сталей в области температур 100–300 °С), предположительно связанной с выпадением из твердого раствора углерода с железом мельчайших частиц карбидов по плоскостям скольжения;

– **зону снижения пластичности в области температур фазовых превращений** (для стали 700–800 °С), что объясняется наличием в деформируемом металле одновременно двух фаз с различными свойствами и приводит к увеличению неоднородности напряженно-деформированного состояния;

– **зону высокотемпературной хрупкости** с характерными для нее явлениями перегрева (резкий рост размеров зерен и снижение пластичности) и пережога (окисление границ зерен и их оплавление) металла.

Нагрев металла до температуры, при которой происходит рекристаллизация, сопровождается понижением его прочности и одновременно повышением способности деформироваться без трещин. **Рекристаллизация** при пластической деформации заключается в появлении зародышей, возникновении и росте новых зерен взамен деформированных. Эти изменения позволяют вести обработку давлением при наименьших деформирующих усилиях и получать максимальное формоизменение заготовки, что обеспечивает осуществление технологического процесса при больших степенях деформации металла, меньших усилиях и расходе энергии. Для чистых металлов $T_{\text{рекр}} \approx 0,4T_{\text{плавления}}$.

Примеси и легирующие добавки, за редким исключением, снижают пластичность металла во всем диапазоне температур горячей обработки. Особенно опасны примеси, образующие с основным ком-

понентом эвтектики по границам зерен. Так, технически чистое железо характеризуется хрупкостью в интервале температур 850–1000 °С (красноломкость) в связи с расплавлением при 985 °С эвтектики FeS, располагающейся по границам зерен в процессе кристаллизации металла.

У целого ряда сплавов (эвтектические сплавы Pb–Sn, Bi–Sn, Zn–Al) при температуре фазовых превращений наблюдается многократное снижение сопротивления деформации и повышение пластичности (сверхпластичность). Сверхпластичность появляется также у многих металлов и сплавов, прошедших специальную термическую обработку для получения ультрамелкозернистой структуры (например, титановый сплав ВТ5, алюминиевый сплав АМг6 и др.).

Состояние сверхпластичности сохраняется в сравнительно узком диапазоне температур и проявляется при очень малых скоростях деформации, что усложняет промышленное воспроизведение этого явления.

Материалы, инструмент, оборудование. Для проведения работы необходимы: образцы, форма и размеры которых показаны на рис. 4.3; нагревательная печь; маятниковый копер.

Выполнение работы. Ударная вязкость исследуемых материалов определяется при разрушении образцов на маятниковом копре КМ-30. Испытания начинают при комнатной температуре, увеличивая ее до 1200 °С с интервалом в 100 °С. От нагревательной печи к копру образцы переносятся с помощью клещей, губки которых изолированы асбестовым шнуром. Для компенсации потерь теплоты при переносе образец перегревают на 30–50 °С. При каждой заданной температуре испытывают три образца и определяют среднее значение ударной вязкости.

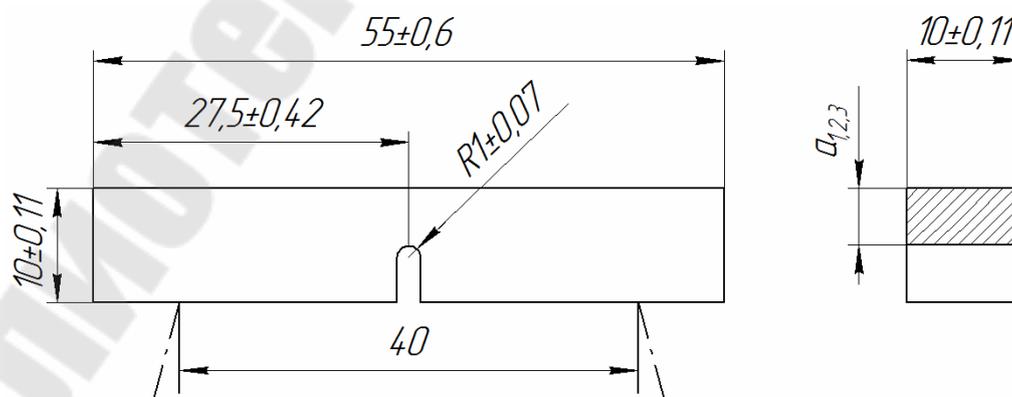


Рис. 4.3. Образец для испытаний на ударную вязкость:

$$a_1 = 8 \text{ мм}; a_2 = 7 \text{ мм}; a_3 = 5 \text{ мм}$$

По результатам проведенных опытов строится температурная диаграмма пластичности и делаются выводы о влиянии температуры на пластичность металла, характеризуются температурные интервалы его повышенной хрупкости.

Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит пластичность металла?
2. Какими показателями оценивается пластичность?
3. Как температура влияет на пластические свойства металла и почему?
4. Закон Курнакова.
5. Каким образом определяют показатели пластичности и сопротивления деформированию?
6. Охарактеризуйте характерные зоны пониженной пластичности металла.
7. Что такое рекристаллизация?

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ОТ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Продолжительность работы – 4 ч.

Цель работы: экспериментальное изучение зависимости пластичности деформируемого материала от его напряженного состояния.

Пластичность – это свойство тела (материала) в определенных условиях нагружения изменять форму и размеры, не разрушаясь, и сохранять остаточные (пластические) деформации после снятия нагрузки.

Пластичность зависит от состава и структуры материала, схемы напряженного состояния, способа обработки, скорости и температуры деформирования и других факторов. Пластичность необходимо рассматривать не только как свойство материала, но и как состояние, в котором он находится в процессе деформирования.

Схема напряженного состояния – один из существеннейших факторов, оказывающих влияние на пластичность материала при его деформировании. Различают девять схем **напряженного состояния** тел: две линейных (рис. 5.1, I), три плоских (рис. 5.1, II) и четыре объемных (рис. 5.1, III). Существуют также три схемы **главных деформаций** (рис. 5.2). Схема главных деформаций определяется схемой действующих сил при деформации и условием постоянства объема, а схема главных напряжений – только схемой действующих сил. Поэтому одна и та же схема главных деформаций может соответствовать разным схемам главных напряжений.

Совокупность схемы главных напряжений и схемы главных деформаций называют **механической схемой деформации** (по С. И. Губкину). Она дает графическое представление о наличии и знаке главных напряжений и главных деформаций. Механическая схема деформации показывает схему действующих сил и определяет ход формоизменения.

Сочетания трех видов схем деформированного состояния с семью схемами плоского и объемно напряженного состояния в совокупности дают 21 механическую схему деформаций. Схема линейного растяжения сочетается со схемой объемной деформации растяжения, а линейная схема сжатия сочетается с объемной схемой деформации сжатия. Таким образом, имеют место 23 механические схемы деформаций.

Процессы деформации можно классифицировать по их схемам (рис. 5.3). Такая классификация позволяет оценить возможности осуществления конкретных процессов при условии обеспечения необходимой пластичности обрабатываемых материалов.

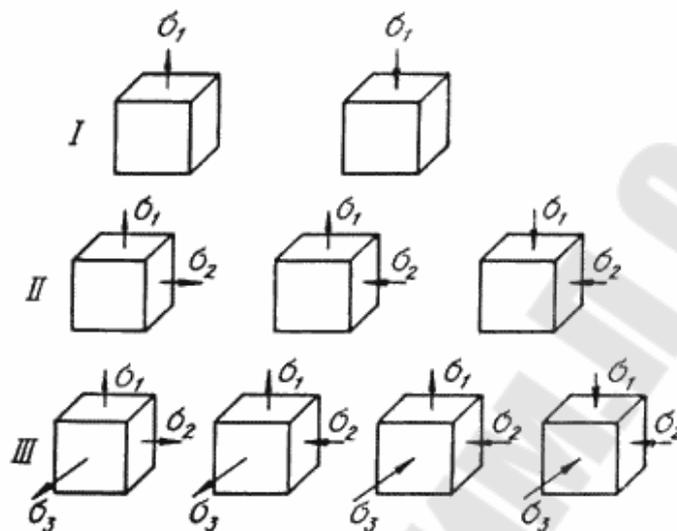


Рис. 5.1. Схемы главных напряжений

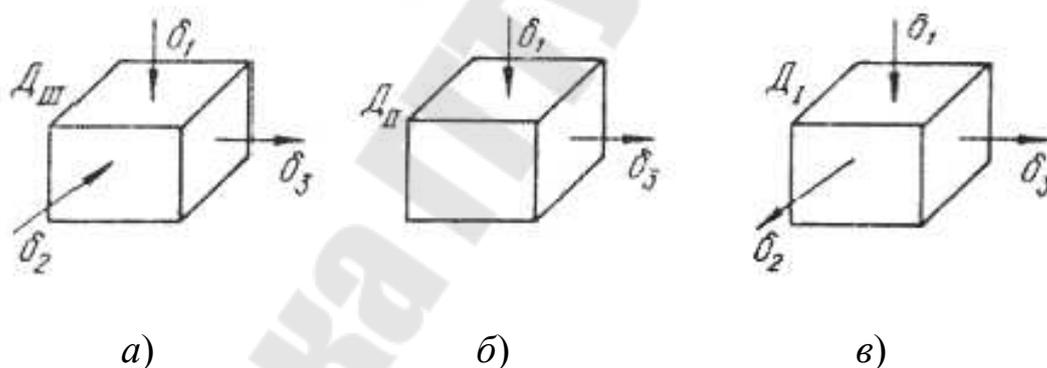


Рис. 5.2. Схемы главных деформаций:
а – растяжение; б – сдвиг; в – сжатие

В общем случае в различных точках деформируемого тела главные напряжения отличаются не только значением, но и направлением. Поэтому конкретная схема главных напряжений характеризует напряженное состояние в элементарном объеме материала и не может быть использована для оценки реальных условий процесса деформирования в целом.

Максимальную пластичность материал имеет при всестороннем равномерном сжатии, минимальную – при всестороннем равномерном растяжении. Чем больше среднее напряжение сжатия, тем выше

пластичность. Это объясняется тем, что в подобных условиях материал уплотняется, нарушения целостности его структуры ликвидируются, затрудняется межкристаллитная деформация и облегчается внутркристаллитная.

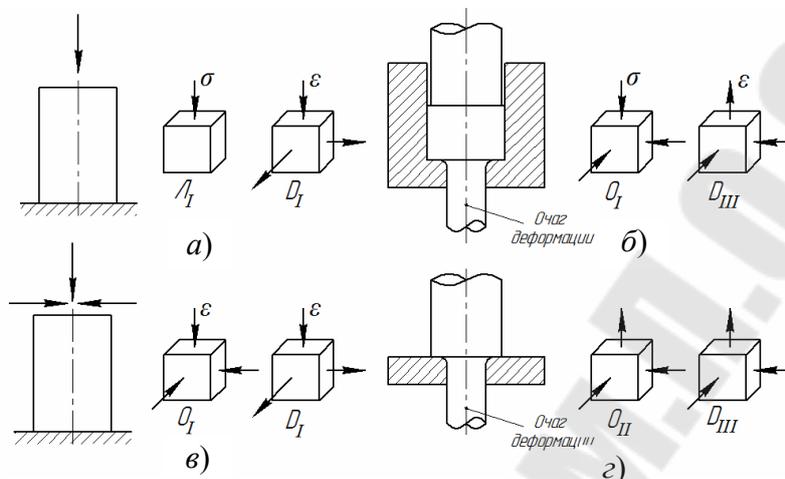


Рис. 5.3. Механические схемы деформации процессов обработки металлов давлением: *а* – осадка без контактного трения; *б* – выдавливание; *в* – осадка; *г* – волочение

Макроразрушения металла возможны при положительной нормальной (растяжения) и сдвиговой деформациях, т. е. металлы могут разрушаться с образованием трещин отрыва и сдвига. Если пластическая деформация объемная (ее компоненты вдоль трех осей отличны от нуля), при растяжении исчерпание деформационной способности металла происходит вследствие нарушения сплошности металла по оси, совпадающей с направлением растягивающего усилия. При деформации сжатия, например, осадке, исчерпание деформационной способности металла происходит вследствие нарушения сплошности не в направлении действия сжимающего усилия, а по одной из двух других осей, вдоль которых имеют место деформации растяжения.

Многообразие и сложность факторов, от которых зависит пластичность материала, не позволяют установить единый критерий (эталон) ее количественной оценки. На практике для определения пластичности широко используют так называемую технологическую пробу в виде испытания образцов на осаживание до появления первой трещины в области максимальных сдвигов и подсчета показателя:

$$\varepsilon = \frac{H - h}{H}.$$

Для качественной оценки влияния схемы напряженного состояния на пластичность металлов целесообразно проводить эксперименты по методу осадки образцов, поскольку при данном способе обработки давлением можно в относительно широком диапазоне изменять соотношения между главными напряжениями σ_1 , σ_2 , σ_3 в различных зонах, вплоть до изменения направления их действия.

В данной работе исследуется пластичность осаживаемого образца при различных контактных условиях (рис. 5.4), которые позволяют изменить соотношения между σ_1 , σ_2 , σ_3 . При использовании первой схемы (рис. 5.4, а) получают обычную осадку, характеризующуюся наличием трех зон (1 – затрудненной деформации; 2 – локализованной деформации; 3 – кольцевой растягивающих напряжений). Во втором случае (рис. 5.4, б), применяя деформируемые свинцовые прокладки различной толщины, можно изменять характер напряженного состояния в элементарных объемах материала вблизи боковой поверхности образца. Подобный эффект достигается при наличии на торце образца выточки (рис. 5.4, в).

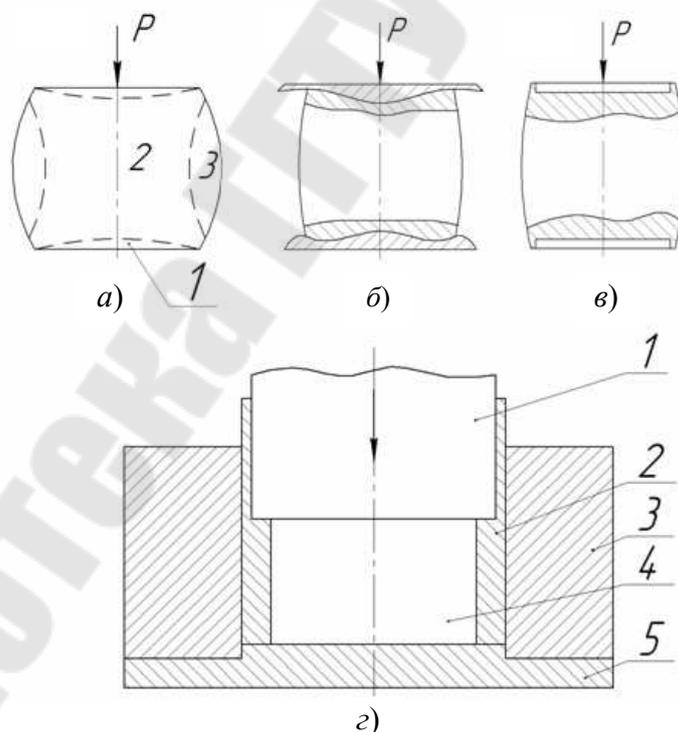


Рис. 5.4. Осадка образца: а – в обычных условиях; б – с применением пластичных прокладок; в – с выполненными выточками для смазочного материала; г – в специальной свинцовой обойме: 1 – пуансон; 2 – обойма свинцовая; 3 – матрица; 4 – образец; 5 – плита

Деформирование образца в свинцовой обойме (рис. 5.4, з) позволяет создать боковое давление на его цилиндрическую поверхность и резко изменить схему напряженного состояния на его периферии.

Можно также изучать зависимость пластичности материала от схемы напряженного состояния при деформировании образцов из малопластичного сплава путем осадки и сравнения показателей относительной деформации.

Материалы, инструмент, оборудование. Для выполнения работы необходимы литые образцы из алюминиевого сплава АЛ-2 диаметром 20 мм и высотой 40 мм (12 шт.); устройство для проведения осадки с боковым подпором; штангенциркуль; универсальная испытательная машина, тензометрическая аппаратура.

Выполнение работы. Подготовленные к испытаниям образцы подвергнуть (по 2 шт.) осаживанию по каждой из приведенных схем до появления на боковой поверхности трещин. С помощью тензометрической аппаратуры записать изменения усилия и абсолютного обжатия. Произвести измерение геометрических размеров деформированных образцов. Полученные данные заносят в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Таблица экспериментальных данных

Размеры образца, мм		ϵ , %	P_{\max} , Н	Примечание
До деформирования	После деформирования			

Контрольные вопросы

1. Что такое пластичность?
2. Что характеризуют схемы главных напряжений и схемы главных деформаций?
3. Что называют механической схемой деформации? Что показывает механическая схема деформации?
4. Сколько механических схем деформаций существует?
5. Каким образом исследуется зависимость пластичности металла от вида напряженного состояния?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Продолжительность работы – 4 ч.

Цель работы: определение коэффициента трения при осадке методом конических бойков в зависимости от состояния контактных поверхностей и скорости деформации.

Трением называют силовое взаимодействие двух тел, соприкасающихся друг с другом, которое возникает, если имеются силы, стремящиеся взаимно переместить контактирующие тела по поверхности их соприкосновения, т. е. в широком смысле, **трение – это процесс сопротивления относительному перемещению тел**. Контакт взаимно перемещающихся тел может быть непосредственным или через промежуточную прослойку, частично или полностью разделяющую тела. К таким прослойкам относятся:

- жидкие смазки;
- густые смазки;
- металлические пленки;
- пленки окислов и др.

При рассмотрении процессов трения говорят о внешнем и внутреннем трении.

Внутреннее трение – силовое взаимодействие отдельных частей (элементов) деформируемого тела, возникающее на плоскостях межкристаллического или внутрикристаллического скольжения. Внутреннее трение препятствует деформации тела.

Внешнее трение – силовое взаимодействие на поверхностях контакта, ограничивающее объемы двух взаимно перемещающихся по этим поверхностям тел.

Характер процессов трения зависит от характера перемещения трущейся пары и характера контакта пары. По характеру взаимного перемещения процессы трения бывают следующие:

- *трение покоя* – внешние силы, стремящиеся создать взаимное перемещение трущейся пары; недостаточны для осуществления перемещения;
- *трение скольжения* – под влиянием внешних сил возникает взаимное перемещение трущейся пары без перекатывания одного элемента по другому;

– *трение качения* – под влиянием внешних сил имеет место взаимное перемещение трущейся пары путем перекатывания одного элемента по другому.

При обработке металлов давлением (ОМД) трение качения отсутствует, а трение покоя возникает, например, в следующих случаях:

– в процессе осадки при сжатии без смазки или при недостаточной смазке;

– в зоне прилипания при прокатке;

– около пресс-шайбы при прессовании.

Основным механизмом трения при обработке металлов давлением является трение скольжения.

Процессы трения при пластической деформации существенно отличаются от трения скольжения в деталях машин:

– при трении в механизмах трущиеся поверхности испытывают только упругие деформации, а при пластической деформации происходит непрерывное обновление контактной поверхности металла и его упрочнение (особенно при холодной деформации);

– значение удельных сил в подшипниках машин и механизмов не превышает 20–40 МПа, а при пластической деформации достигает 2000–2500 МПа.

подавляющее большинство технологических процессов обработки металлов давлением протекает при наличии контактного трения между поверхностью обрабатываемого металла и рабочего инструмента. Для всех процессов обработки давлением, кроме прокатки, силы трения являются вредными. При прокатке силы трения являются активными, без них процесс прокатки становится невозможным.

Наличие сил контактного трения приводит к изменению схемы напряженного состояния, неравномерности деформации, увеличению усилия и расхода энергии на деформацию, износу инструмента, ухудшению качества поверхности получаемых изделий и т. д. Поэтому важно знать величину сил или коэффициента трения и зависимость их от различных условий процесса пластической деформации.

Коэффициент трения представляет отношение силы трения к действующему на поверхности контакта нормальному давлению:

$$\mu = \frac{T}{P}.$$

На условия трения и коэффициент трения влияет ряд факторов:

– состояние поверхности рабочего инструмента. Если бойки, между которыми осаживается заготовка, имеют следы от шлифовки, то металл течет неравномерно, и после осадки образец примет эллиптическую форму. Понятно, что, чем меньше класс шероховатости, тем меньше контактное трение;

– состояние поверхности заготовки. Исходная шероховатость поверхности играет роль только в самом начале деформации. Затем поверхность выравнивается и уже не влияет на ход деформации. Однако значительные гребни и впадины на поверхности заготовки могут привести к дефектам в получаемых изделиях и полуфабрикатах;

– смазка на поверхности контакта. При наличии смазки уменьшается коэффициент трения, облегчаются условия деформации, снижается требуемое усилие, обеспечивается получение более равномерной структуры металла, повышается качество поверхности продукта обработки;

– удельное усилие на поверхности контакта. Чем меньше удельное усилие, тем меньше касательные силы трения;

– температура деформации – рост температуры деформации в общем случае ведет к увеличению трения, но эта зависимость носит сложный характер и напрямую зависит от химического состава окалина при нагреве;

– скорость деформирования. Является одним из важнейших факторов. При повышении скорости понижается коэффициент трения;

– химический состав материала инструмента влияет на условия трения, поведение окалина при горячей обработке, состояние поверхности инструмента. Трение минимально при минимальной толщине окислов, после чего оно увеличивается с ростом толщины окислов. Вредное влияние оказывают хрупкие окислы, особенно при горячей деформации. Продукты износа инструмента также участвуют в процессе трения;

– характер нагрузки – вибрационный характер нагружения деформируемого тела уменьшает в 1,5–2 раза контактное трение и неравномерность деформации;

– значение коэффициента трения зависит от прочностных и упругих свойств трущихся металлов. Чем меньше упругость и прочность металлов, тем больше их податливость и тем выше значение коэффициента трения. Поскольку инструмент имеет большую упругость и прочность, чем деформируемый металл, коэффициент трения в этом

случае значительно ниже, чем при трении металлов с одинаковой податливостью. Установлено, что значение коэффициента трения меньше, если трущиеся поверхности относятся к разным металлам.

Для определения коэффициента трения при пластической деформации применяют методы конических бойков, бочкообразности, смещения образца, клещевого захвата, опережения, непосредственного замера сил трения и нормального давления с использованием мессдоз, разрезного инструмента и т. д.

Метод конических бойков, предложенный С. И. Губкиным, позволяет определить коэффициент трения при осадке непосредственно на прессах, молотах и другом оборудовании при различных скоростях деформации. Для этого необходимо иметь набор конических бойков с различными значениями угла при вершине (рис. 6.1).

Сущность метода заключается в том, что цилиндрический образец с коническими торцевыми выемками осаживается двумя одинаковыми бойками с тем же углом образующей конуса α , что и у образца. На контактной поверхности будет действовать нормальное давление P и сила трения T . Сила трения будет задерживать течение металла от центра образца к периферии, нормальное давление ее, наоборот, будет способствовать течению металла в этом направлении:

$$P_x = P \sin \alpha ;$$

$$T_x = T \cos \alpha .$$

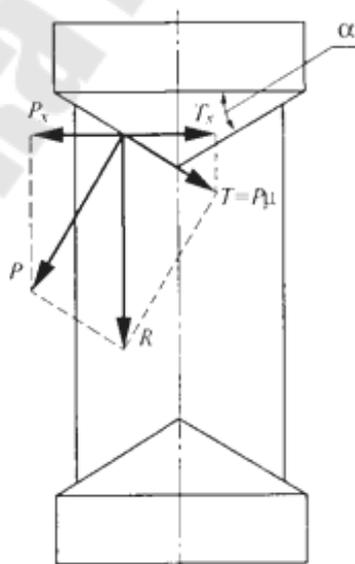


Рис. 6.1. Схема действующих сил при осадке образца коническими бойками

Если $P \sin \alpha = T \cos \alpha$, действие указанных сил уравновесится и образец при осадке сохранит цилиндрическую форму. Следовательно, коэффициент трения в этом случае можно определить из выражения

$$\mu = \frac{T}{P} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha.$$

В случае, если $P \sin \alpha < T \cos \alpha$, будет преобладать действие сил контактного трения и образец получит бочкообразную форму. При $P \sin \alpha > T \cos \alpha$ образец получает вогнутую форму боковой поверхности.

Значение коэффициента трения определяется подбором бойков с углом α , при котором осаживаемые образцы сохраняют цилиндрическую форму. Точные результаты можно получить при соотношении размеров образцов $\frac{H}{D} = 1,5$; при этом осадка производится на 20–25 %.

Метод «бочкообразности». При осаживании с трением цилиндрический образец получает бочкообразную форму. С. И. Губкин рекомендовал определять коэффициент трения по степени бочкообразности, характеризуемой выражением (рис. 6.2):

$$\alpha = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max}}.$$

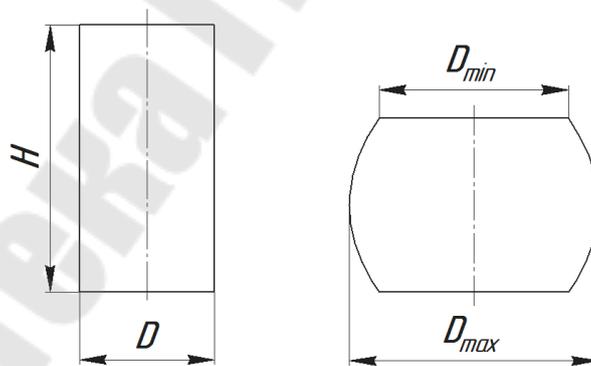


Рис. 6.2. Изменение формы цилиндрического образца при осадке

Если соблюдены рекомендуемые размеры $H = D$ и степень деформации $\varepsilon = 0,25$, то коэффициент трения в этом случае можно определить из выражения:

$$\mu = 5(\alpha + 2\alpha^2).$$

Этот метод не обладает высокой точностью, но его можно применять для относительно простой оценки коэффициента трения.

Метод клещевого захвата. Метод предложен И. М. Павловым. Схема к определению коэффициента трения методом клещевого захвата показана на рис. 6.3.

При захвате полосы валками ее дальнейшей прокатке препятствует пружина, соединенная с динамометром. В валках создается искусственное торможение полосы. Динамометр измеряет горизонтальную силу T , которая вызывает буксование полосы. В момент буксования уравниваются действующие силы и их горизонтальные составляющие:

$$2P_H \sin \frac{\alpha}{2} + T = 2P_H \mu \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Отсюда

$$\mu = \frac{T}{2P_H \cos \frac{\alpha}{2}} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

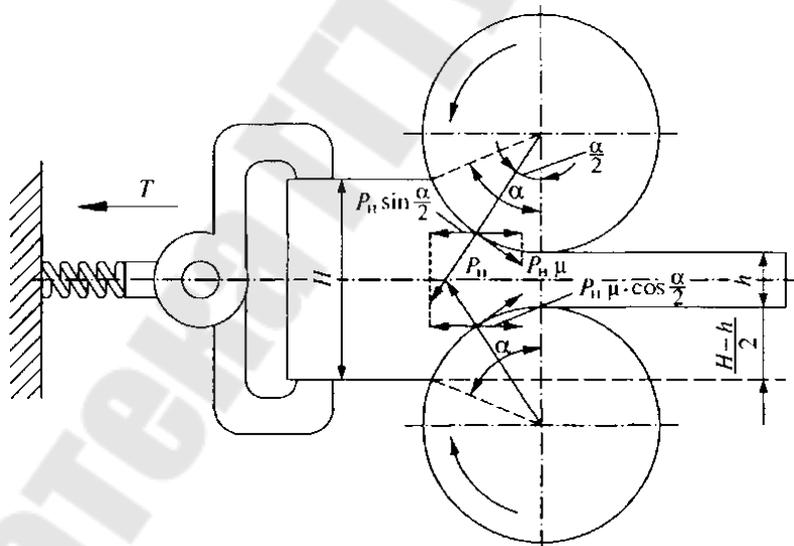


Рис. 6.3. Схема к определению коэффициента трения методом клещевого захвата

Угол захвата α рассчитывают, исходя из величины обжатия:

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{H-h}{R}}.$$

Метод клещевого захвата достаточно точен, но сложен в осуществлении.

Метод максимального угла захвата металла валками. При естественном захвате коэффициент трения:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha,$$

где α – наибольший угол, при котором обеспечивается захват полосы валками прокатного стана (рис. 6.4).

Угол трения – угол, тангенс которого равен коэффициенту трения:

$$\operatorname{tg} \beta = \mu.$$

На рис. 6.4 угол трения равен углу между равнодействующей силой R и силой P ортогональной поверхности валка.

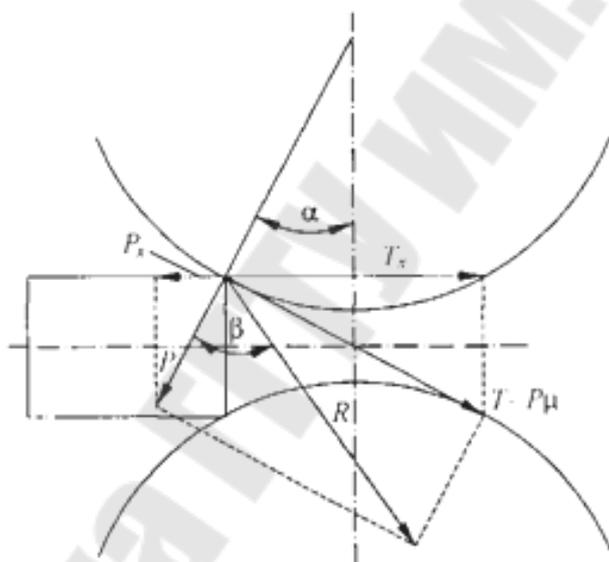


Рис. 6.4. Схема к определению коэффициента трения по максимальному углу захвата при прокатке: $P_x = P \sin \alpha$; $T_x = P \mu \cos \alpha$

Метод опережения. Опережение заключается в том, что скорость выхода полосы из валков прокатного стана всегда больше окружной скорости самих валков. Если на валки нанести отметки на расстоянии l_B , то на прокатанной полосе расстояние между отпечатками будет равно l_{II} . Экспериментально опережение определяется по формуле

$$S = \frac{l_{II} - l_B}{l_B}.$$

В то же время опережение выражается через основные характеристики процесса прокатки:

$$S = \frac{\gamma^2 R}{h},$$

где γ – нейтральный угол при прокатке; R – радиус валков; h – высота полосы после прокатки.

Угол γ связан с углом трения β и углом захвата α , откуда, в свою очередь, можно определить угол трения β , а по нему – коэффициент трения μ , как это показано ранее.

Материалы, инструмент, оборудование. Коэффициент трения определяют при осаживании цилиндрических стальных образцов диаметром 15 и высотой 20 мм. Для проведения работы необходимо иметь набор конических бойков, углы которых отличаются друг от друга на 1–2°, вертикальный копер; испытательную машину; приспособления для осадки и накернивания образцов; жидкость для обезжиривания контактных поверхностей (бензин, ацетон, эфир, спирт); смазку и штангенциркуль.

Выполнение работы. Деформацию образцов производят в приспособлении (рис. 6.5), состоящем из пуансона и гильзы, в которую помещают сменные конические бойки. Чтобы обеспечить соосную установку образца, торцы его предварительно центрируются путем накернивания в приспособлении, изображенном на рис. 6.6.

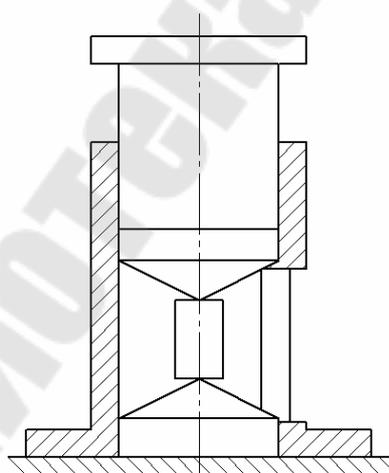


Рис. 6.5. Приспособление для осадки образцов коническими бойками

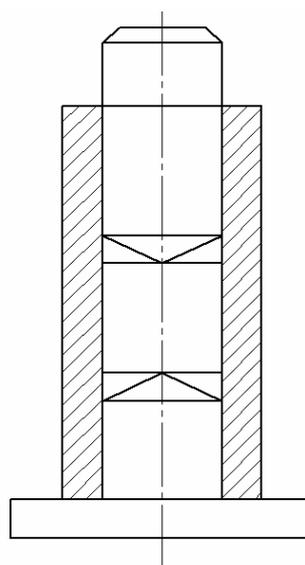


Рис. 6.6. Приспособление для накернивания торцов образцов

Характер боковой поверхности образца после деформации определяют на просвет при помощи линейки (рис. 6.7). При вогнутой форме образца (рис. 6.7, *а*) $\operatorname{tg}\alpha > \mu$, т. е. угол конуса занижен против искомого, а при бочкообразной (рис. 6.7, *в*) – завышен. Формула для определения коэффициента трения справедлива в том случае, когда образующая образца прямолинейна, за исключением скругленных участков у торцов высотой 1,5–2 мм, которые появляются за счет утяжки металла, так как образцы не имеют конусных выточек (рис. 6.7, *б*).

Коэффициент трения определяют при комнатной температуре на образцах одной и той же марки стали при статическом (на испытательной машине) и динамическом (на вертикальном копре) нагружении без смазки (бойки и торцы образцов обезжирены) и со смазкой.

После каждого эксперимента исследуют характер боковой поверхности образца. Если при некотором значении угла конуса образец получится бочкообразным, то следующую пару бойков берут с заведомо меньшим значением угла при вершине с тем, чтобы получить вогнутую боковую поверхность. После этого путем осадки нескольких образцов определяют промежуточное значение угла, при котором образующая образца остается прямолинейной. По полученному значению угла конических бойков определяют величину коэффициента трения.

Степень деформации при осаживании всех образцов должна быть одинаковой, что достигается применением подкладных ограничительных колец.

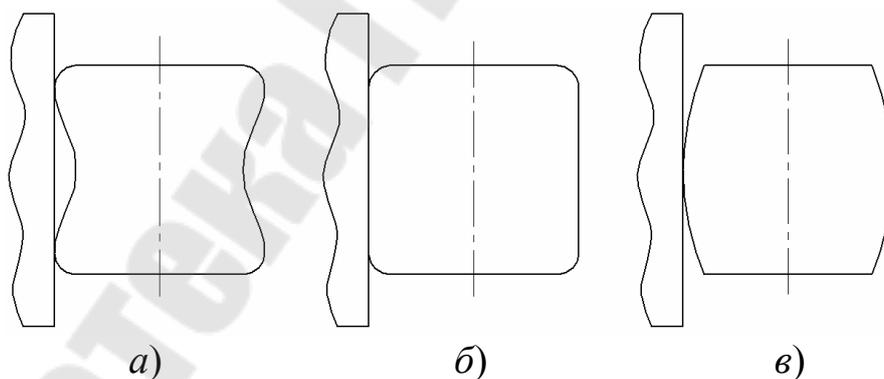


Рис. 6.7. Определение характера деформации:
а – вогнутая форма образца; *б* – прямая образующая;
в – бочкообразующая форма

Результаты экспериментов сводятся в табл. 6.1.

На основании полученных экспериментальных данных необходимо сделать выводы о влиянии скорости деформации и смазки на величину коэффициента контактного трения.

Таблица экспериментальных данных

Номер опыта	Угол при вершине конуса	Характер боковой поверхности образца после осадки	Смазка	Скорость в начале деформации, м/с	Коэффициент трения, μ

Контрольные вопросы

1. Что называют трением?
2. Виды трения.
3. В чем отличие трения качения и трения скольжения?
4. В чем отличие трения при пластической деформации от трения скольжения в деталях машин?
5. Укажите вредную и полезную роль трения в процессах ОМД?
6. Какие факторы оказывают влияние на коэффициент трения?
7. Какие существуют способы для экспериментального определения коэффициента трения?
8. Каковы пути уменьшения трения при ОМД?

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТКРЫТОМ ОСАЖИВАНИИ ЗАГОТОВОК

Продолжительность работы – 4 ч.

Цель работы: ознакомление со способами изучения распределения нормальных контактных напряжений при открытом осаживании.

Напряжения и деформации в объеме деформируемого металла распределяются, как правило, неравномерно. **Основными причинами неравномерности деформации при ОМД являются:**

- внешнее трение;
- физическая, химическая и механическая неоднородность деформируемого тела;
- основные условия деформации: форма тела, геометрия инструмента, вид нагружения, характер очага течения, распределение температуры в деформируемом теле и инструменте и др.

Неравномерное распределение напряжений и деформаций приводит к ряду отрицательных последствий:

- повышению сопротивления деформированию металла и, как следствие, увеличению усилия, необходимого для осуществления пластической деформации;
- появлению растягивающих напряжений и снижению пластических свойств деформируемого металла;
- возникновению неоднородной структуры;
- появлению остаточных напряжений;
- к увеличению работы, затрачиваемой на деформирование, затруднению процесса деформации, ухудшению качества продукции.

Контактное трение при пластическом деформировании является одной из основных причин неравномерного распределения нормальных напряжений по контактным поверхностям (рис. 7.1).

При открытом осаживании цилиндрических образцов нормальное контактное напряжение равно пределу текучести у кромок образца и возрастает к его центру (рис. 7.2). Степень неравномерности распределения нормальных контактных напряжений зависит от сил контактного трения и отношения диаметра образца к его высоте. Чем больше это отношение, тем выше напряжение в центре образца.

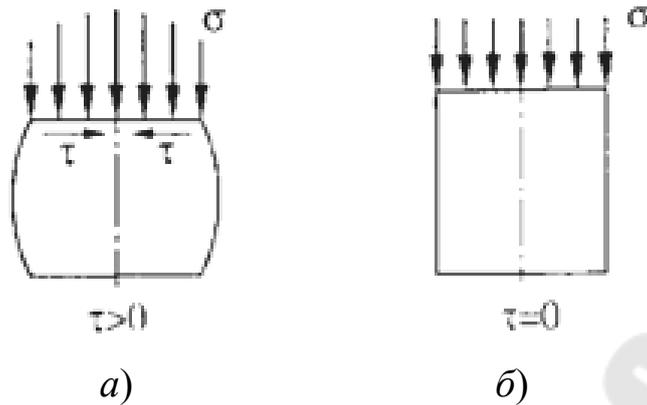


Рис. 7.1. Влияние трения на формоизменение:
a – форма цилиндра при осадке с внешним (контактным) трением;
б – без трения

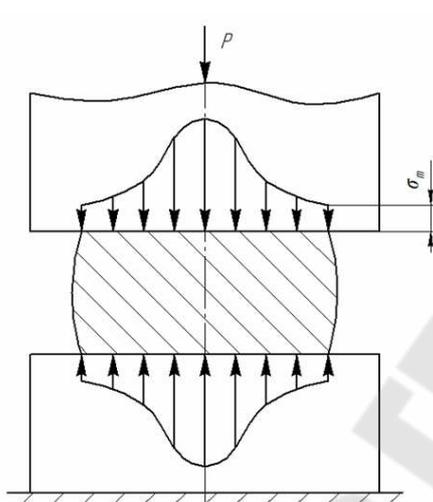


Рис. 7.2. Распределение нормальных напряжений на контактной поверхности при открытом осаживании

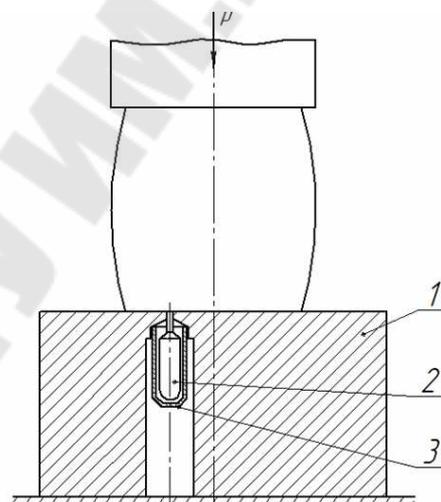


Рис. 7.3. Определение контактных нормальных напряжений с помощью точечных месдоз

Неравномерное распределение нормальных напряжений в зоне контакта вызывает местный неравномерный упругий прогиб инструмента. Например, при чеканке-калибровке это приводит к тому, что торцевые поверхности заготовки после деформирования не остаются плоскими, а приобретают чечевицеидальную форму.

Изучение распределения нормальных напряжений по контактным поверхностям при осаживании заготовок можно производить различными способами. Количественно они могут быть оценены при помощи точечных месдоз, что схематично показано на рис. 7.3. В нижнем бойке выполняются отверстия, в которые вставляются штифты 2 точечных месдоз. Один конец штифта выходит на контактную поверхность и

шлифуется с нею заподлицо, а другой упирается в упругий элемент 3, на котором наклеены тензометрические датчики. Предварительно точечная мессдоза тарируется при помощи грузов или на точной испытательной машине.

Качественно характер эпюры нормальных напряжений по контактной поверхности можно оценить по глубине затекания металла в отверстия (рис. 7.4, *а*) или щель (рис. 7.4, *б*), выполняемые в бойке. При использовании метода отпечатков штифта на контактной поверхности инструмента в подлежащих контролю точках имеются отверстия диаметром 1–3 мм, в которые вставляются штифты с индентором в виде конуса (шарика). В процессе деформирования металл затекает в отверстие, штифт под его давлением утапливается, и индентор на поверхности эталона (крешера или пластины) делает отпечаток.

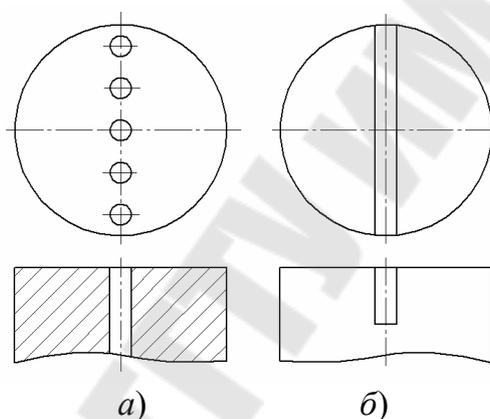


Рис. 7.4. Форма плит для изучения затекания металла в процессе деформации

По диаметру или глубине отпечатка определяют наибольшее усилие на штифт в процессе деформирования (рис. 7.4, *а*). Отношение усилия к площади, в пределах которой имеет место давление металла на штифт, принимают за нормальное напряжение на контактной поверхности в точке, соответствующей центру штифта. Отметим, что определенное по размерам отпечатка индентора нормальное напряжение значительно отличается от фактически действовавшего при деформации, т. е. размеры отпечатков характеризуют процесс тоже только качественно, а не количественно.

Определение эпюр нормальных напряжений различными методами показывает, что тип кривых, приведенных на рис. 7.2, соответствует лишь образцам с большим отношением D / H , а также значительным степеням деформации. При малых степенях деформации, а

также отношениях $D/H < 2$ эпюры нормальных напряжений принципиально отличны. Кривые имеют вогнутый характер, и нормальные напряжения в периферийных областях контактной поверхности больше, чем в центре. Это подтверждается формой гребешка металла, затекающего при осадке в узкую щель бойка (рис. 7.5).

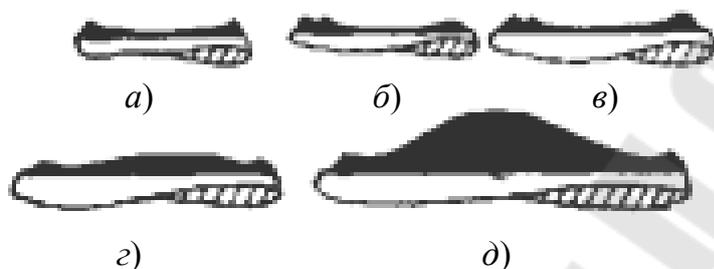


Рис. 7.5. Изменение формы гребешка затекания металла в процессе осадки цилиндрического образца при различной степени деформации: $a - \varepsilon = 10 \%$; $b - \varepsilon = 20 \%$; $e - \varepsilon = 40 \%$; $z - \varepsilon = 60 \%$; $d - \varepsilon = 80 \%$

При высоких степенях деформации и $D/H > 4$ характер кривых уже не меняется, и напряжения в центральной зоне превосходят напряжения на периферийных участках контактной поверхности.

В общем случае на контактной поверхности при осаживании цилиндрических заготовок имеются три зоны: скольжения, торможения и застоя (прилипания), хорошо наблюдаемые визуально. При осаживании образцов плоскопараллельными плитами, не имеющими направленных следов обработки на своей рабочей поверхности, границы зон ярко очерчены и представляют собой концентрические окружности. Зона прилипания занимает центральную часть контактной поверхности. Окисная пленка, покрывающая торцы образцов до осаживания, на этом участке контактной поверхности сохраняется, что указывает на то, что поверхностные слои металла этой зоны не претерпевали пластической деформации. При постоянном начальном диаметре образца из данного металла размеры этой зоны одинаковы и, следовательно, не зависят от соотношения D/H .

Следующая концентрическая зона имеет блестящую поверхность со следами радиального течения металла, края ее ярко очерчены. Эта зона является областью неполного скольжения (торможения). Размеры ее зависят от текущего диаметра образца, но не зависят от его начальной высоты.

Периферийная кольцевая зона имеет на поверхности ясные следы интенсивного радиального течения металла, что указывает на скольжение слоев металла в этой зоне. Размеры ее зависят от начальной высоты образца и степени его осаживания. Это зона перехода металла боковой поверхности на контактную.

При осаживании образцов со смазыванием контактных поверхностей образуется центральная зона, занимающая большую часть образца, с матовой поверхностью и обрамляющая ее область металла в виде блестящего кольца небольшой ширины.

По эпюрам нормальных напряжений можно рассчитать удельные усилия деформирования для каждой из характерных зон (участков эпюры). На практике с достаточной степенью точности пользуются приближенными эмпирическими формулами (по Е. П. Унковой и Э. Зибелю).

Материалы, инструмент, оборудование. Для выполнения работы необходимы: цилиндрические образцы с различным соотношением начальных размеров из свинца и мягкого алюминия; универсальный штамповый блок для осаживания образцов с набором различных бойков и направляющей обоймой (используются бойки с вертикальной щелью и гладкие с разной шероховатостью рабочей поверхности); универсальная испытательная машина; микроскоп МПБ-2; смазочные материалы – масло индустриальное и парафин; растворитель для обезжиривания образцов; штангенциркуль.

Выполнение работы. Для оценки эпюры удельных усилий деформирования (нормальных напряжений на контактной поверхности) производят свободное осаживание исходных образцов с разным соотношением D/H на бойках, один из которых имеет узкую вертикальную щель. Осаживание отдельных образцов производится на подкладной деформирующей плите (как на смазанной, так и на обезжиренной), оснащенной измерительными штифтами.

После осадки образца замеряется и зарисовывается профиль металла, затекшего в щель. С помощью микроскопа (например, типа МПБ-2) производят замер отпечатков инденторов на эталонной пластине. Предварительная тарировка штифтов позволяет с известной долей приближения оценить удельные усилия деформирования в определенных точках контактной поверхности осаживаемых образцов и построить их эпюры. Характер полученных эпюр сравнивают с формой гребешка затекшего в щель металла (для аналогичных образцов).

Далее образцы осаживают плоскими бойками на универсальной испытательной машине с записью индикаторной диаграммы, которую затем используют для построения кривой изменения средних удельных усилий деформирования в зависимости от степени деформации, и рассчитывают среднее удельное усилие:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P}{F} = \frac{4P}{\pi D^2} (1 - \varepsilon)$$

для разных случаев осаживания. В заключение делаются выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Основные причины неравномерности напряжений и деформаций при пластическом деформировании.
2. Какие негативные последствия влечет за собой неравномерное распределение напряжений и деформаций при ОМД?
3. От чего зависит степень неравномерности распределения нормальных контактных напряжений?
4. Как количественно и качественно можно оценить степень неравномерности распределения нормальных контактных напряжений при осаживании заготовок?

Лабораторная работа № 8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА НАИМЕНЬШЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Продолжительность работы – 4 ч.

Цель работы: изучение изменения формы поперечного сечения тел с круглым, квадратным и прямоугольным основанием на различных стадиях процесса осаживания без смазки и со смазкой.

При ОМД иногда необходимо определить соотношение между перемещениями металла в разных направлениях. Иногда это сделать достаточно просто на основании закона постоянства объема. Например, при плоской деформации одна из деформаций равна нулю, а деформации по двум другим осям равны между собой по абсолютной величине и противоположны по знаку.

В общем случае объемной деформации сложно определить соотношение деформаций. Например, при ковке образца, имеющего форму параллелепипеда с заданной высотной деформацией $\eta = \frac{h_1}{h_0}$, на основании закона постоянства объема можно определить только произведение коэффициентов деформации по длине и ширине $\beta\lambda = 1/\eta$. Для нахождения β и λ имеющейся информации недостаточно.

Если бы возможно было производить ковку без трения, то течение металла в плоскости сечения заготовки было бы таким, как на рис. 8.1.

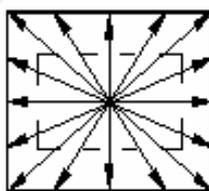


Рис. 8.1. Схема осадки образца с прямоугольным основанием без трения

Такая схема течения металла называется **радиальной**. При этом форма поперечного сечения сохраняется, соотношение сторон – const, а коэффициенты деформации по длине и ширине равны между собой:

$$\beta = \lambda = \frac{1}{\sqrt{\eta}}.$$

При ковке с трением создается сопротивление течению металла, разное по длине и ширине заготовки. Направление течения металла в этом случае определяют на основании **закона наименьшего сопротивления**: в случае возможности перемещения точек деформированного тела в различных направлениях каждая точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления.

При ковке *сопротивление будет наименьшим в направлении кратчайшей нормали к периметру*.

Квадратное сечение делится диагоналями на участки, в которых направления кратчайших нормалей к периметру параллельно, а значит, все частицы этого участка перемещаются в одном направлении (рис. 8.2, а).

Если сечение не квадратное, то его разделяют биссектрисами углов и линией, соединяющей пересечение этих биссектрис. Линии, разделяющие сечение на участки с разным направлением сечения, называют линиями раздела. Такая схема течения металла называется **нормальной** (рис. 8.2, б).

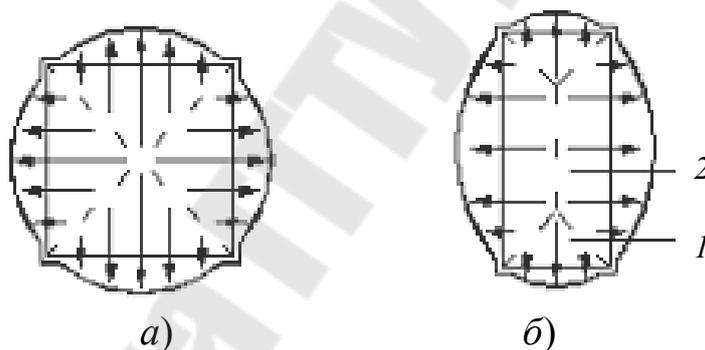


Рис. 8.2. Схема осадки образца с наличием сил трения:
а – образец с квадратным основанием; б – образец с прямоугольным основанием

Площади участков 1 малы по сравнению с участками 2. Поэтому деформация в этом направлении будет меньше, чем в направлении длинной стороны прямоугольника. Чем больше разница длин сторон, тем больше разница деформаций. При большом отношении размеров деформацией в направлении меньшей из сторон можно пренебречь и схему деформаций считать плоской.

Чем длиннее нормаль, тем больший объем обеспечивает течение металл, тем больше деформация. Чем ближе элемент находится к углу сечения, тем меньшее удлинение он получит. Поэтому стороны сече-

ния получают выпуклую форму. Квадратное сечение будет приближаться к круговому, а прямоугольное – сначала к эллипсу, а затем все равно к кругу. Отсюда **правило наименьшего периметра: при ковке с трением поперечное сечение любой формы стремится к круговому, имеющему наименьший периметр при данной площади сечения.**

В реальных условиях ни радиальная, ни нормальная схема не наблюдаются в чистом виде, а имеет место промежуточная – **реальная**. Чем меньше коэффициент трения, тем ближе реальная схема к радиальной; чем больше коэффициент трения, тем ближе реальная схема к нормальной. Следовательно, соотношение деформаций в длину и ширину зависит не только от соотношения исходных размеров, но и от коэффициента трения.

Материалы, инструмент, оборудование. Для выполнения работы необходимы образцы следующей формы и размеров: цилиндрические образцы диаметром 20–30 мм и высотой 30 мм; образцы квадратного сечения высотой 30–40 мм и стороной квадрата 20 мм; образцы с прямоугольным профилем поперечного сечения размером 16 × 30 мм и высотой 30 мм. Материал образцов – свинец.

При выполнении работы используют универсальную испытательную машину или пресс; штангенциркуль, обезжиривающую жидкость (спирт, ацетон, бензин); смазку, плоские бойки и подкладные кольца.

В качестве смазки применяют минеральные или растительные масла.

Выполнение работы. Вначале зарисовывается форма поперечного сечения образца каждого вида. Затем производят деформацию по одному образцу каждого вида со смазкой и без смазки. В последнем случае поверхности образца и бойков обезжириваются. Скорость деформирования во всех опытах постоянна. Деформацию образцов производят ступенями с обжатием 8–10 мм на каждой ступени. После каждого обжатия фиксируется форма поперечного сечения образца путем зарисовки. Для ограничения деформации на каждой ступени применяют подкладные кольца. Всего необходимо получить 3–4 степени деформации.

По результатам работы необходимо сделать заключение о влиянии на формоизменение образцов степени деформации и контактных условий (со смазкой и без смазки).

Контрольные вопросы

1. Закон наименьшего сопротивления.
2. Правило наименьшего периметра.
3. Есть ли разница в течении металла при пластическом деформировании при наличии и отсутствии сил трения?
4. Охарактеризуйте различные схемы течения металла при обработке металлов давлением.

Лабораторная работа № 9

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ДЕЙСТВИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ

Продолжительность работы – 2 ч.

Цель работы: ознакомление с причинами появления дополнительных и остаточных напряжений. Изучение влияния формы прокатываемой полосы на характер распределения дополнительных напряжений. Изучение влияния степени деформации на упрочнение металла при прокатке.

При обработке металлов давлением за редким исключением возникает неоднородность напряженного состояния, а следовательно, и неоднородность деформации. В связи с неоднородностью деформации отдельные слои и элементы тела стремятся к различному изменению размеров и оказывают взаимное влияние друг на друга. В результате этого кроме внутренних сил, уравнивающих внешние приложенные силы, в теле возникают взаимно уравнивающиеся внутренние силы, обуславливающие напряжения, которые не могут быть отражены условиями равновесия. Эти взаимно уравнивающиеся напряжения называются *дополнительными*.

Неравномерность деформации может быть обусловлена формой деформируемой заготовки и инструмента, неоднородностью химического состава и механических свойств металла, а также действием сил контактного трения.

В процессе деформации внешние усилия уравниваются внутренними силами (*основные напряжения*). После снятия нагрузки основные напряжения исчезают. Дополнительные же напряжения, как взаимно уравнивающиеся, могут оставаться в металле и называются в этом случае *остаточными напряжениями*. Остаточные напряжения, как правило, нежелательны, так как снижают пластичность металла и его химическую стойкость, вызывают поводку и коробление деталей, понижают ударную вязкость и предел усталости. В процессе деформации основные и дополнительные напряжения складываются. Суммарные напряжения называют *рабочими напряжениями*.

Дополнительные, а следовательно, и остаточные напряжения в зависимости от объема, в котором они уравниваются, бывают **трех родов**: *напряжения первого рода уравниваются между большими объемами или отдельными частями тела; напряжения*

второго рода уравниваются между отдельными зернами и третьего – между отдельными элементами зерна.

Сложение дополнительных напряжений одного знака с основными резко повышает величину рабочих напряжений. В отдельных случаях вследствие резкого снижения пластичности может произойти разрушение деформируемого тела. Особенно опасны растягивающие дополнительные напряжения, действующие в поверхностных слоях заготовки.

Причины появления дополнительных напряжений и их влияние на поведение деформируемого металла можно изучить на примере холодной прокатки полос.

При прокатке полосы между бочкообразными валками (рис. 9.1) в ней появляются дополнительные напряжения в связи с неравномерным обжатием полосы по ширине. В этом случае причиной появления дополнительных напряжений является форма деформирующего инструмента.

Влияние формы исходного сечения полосы на характер распределения и величину дополнительных напряжений первого рода можно изучить при прокатке между цилиндрическими валками.

При прокатке между цилиндрическими валками полосы прямоугольного сечения также возникают дополнительные напряжения первого рода. Если по краям полосы перед прокаткой сделать надрезы, как это показано на рис. 9.2, то в процессе прокатки в местах надрезов образуются разводы, которые указывают на то, что в этих местах действовали растягивающие дополнительные напряжения. Причиной возникновения их в этом случае является контактное трение. Силы трения приводят к неравномерному распределению удельных давлений по ширине очага деформации (рис. 9.3). Частицам металла, расположенным по краям полосы, вследствие меньшего сопротивления легче течь в уширение. Зато металл средней части полосы течет в большей степени в направлении прокатки, увлекая за собой и края полосы. В результате в центральной части полосы возникают сжимающие, а в крайних – растягивающие дополнительные напряжения. Они-то и являются часто причиной рванин на кромках при значительных степенях деформации.

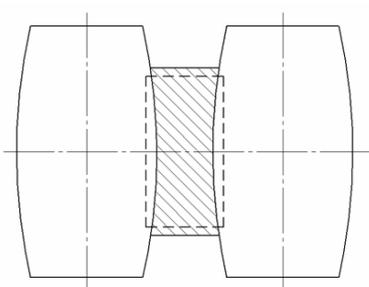


Рис. 9.1. Схема прокатки полосы прямоугольного сечения между бочкообразными валками

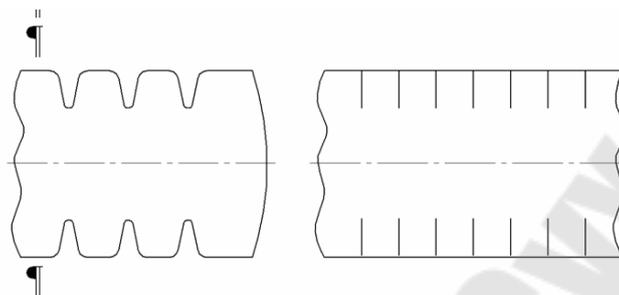


Рис. 9.2. Прокатка надрезной полосы

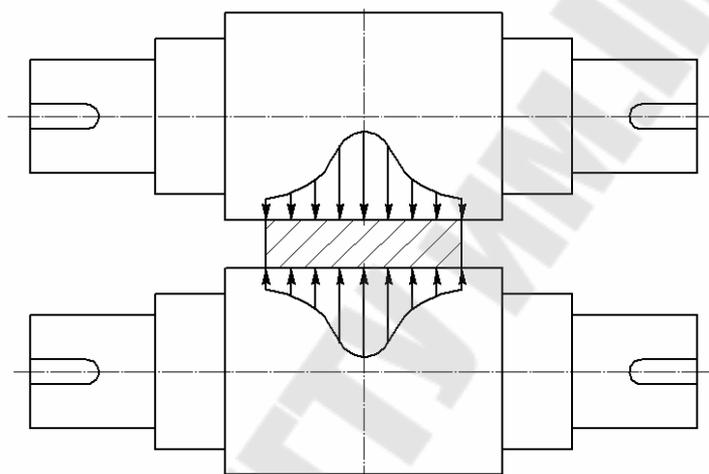


Рис. 9.3. Распределение давления по длине валка

Итак, **остаточные (внутренние) напряжения** уравниваются внутри тела и присутствуют в нем без приложения внешней нагрузки. Внутренние напряжения могут возникнуть в результате фазовых превращений при неравномерном нагреве или охлаждении. Остаточные напряжения в большинстве случаев нежелательны, так как они ухудшают свойства металлов.

Если при эксплуатации изделия напряжения от внешней нагрузки совпадут по знаку с остаточными, то результирующие напряжения могут превысить допустимые. При неправильной технологии обработки давлением остаточные напряжения могут достигать значений, близких к пределу текучести, и тогда незначительные нагрузки могут привести к разрушению изделия.

Остаточные напряжения с течением времени частично снимаются, что может привести к изменению размеров тела и короблению. Остаточные напряжения снижают коррозионную стойкость металла.

Это приводит к местному разъеданию, порче поверхности и концентрации напряжений вблизи поврежденных мест.

Остаточные напряжения определяют механическим и рентгенографическим методами.

Рассмотрим методы устранения остаточных напряжений.

Основной метод – предотвращение их появления правильным режимом обработки, при котором неравномерность сводится к минимуму, а дополнительные напряжения снимаются в процессе деформации и не приводят к появлению остаточных напряжений.

Для достижения этого всю неравномерную деформацию необходимо осуществлять в начальной стадии обработки, особенно при горячей ОМД. В этих условиях облегчается протекание металла из сильнообжимаемых частей в слабообжимаемые, пластичность металла высокая. Дополнительные напряжения не приводят к разрушениям и постепенно уменьшаются в процессе деформации в результате рекристаллизации. Температура должна быть одинаковой, коэффициент трения минимальный, температура не должна соответствовать температуре межфазового перехода.

Иногда дополнительно создают неравномерность деформации, чтобы она компенсировала другие виды напряжений. Например, при горячей прокатке биметаллической катанки (сталь-медь) для уменьшения разницы прочностных свойств слоев подстуживают медную оболочку. И неравномерность деформации, обусловленная разницей физических свойств меди и стали, устраняется разницей температур.

Если нельзя избежать появления остаточных напряжений (например, при холодной ОМД), то их можно снять дополнительной обработкой. Обычно это – термообработка после ОМД. Напряжения 1-го и 2-го рода обычно полностью снимаются при рекристаллизации.

Остаточные напряжения могут быть сняты и механическим способом: поверхностной обработкой давлением (обкаткой, обдувкой стальной дробью, правкой листов с помощью правильных роликов).

Материалы, инструмент, оборудование. 1. Для изучения влияния формы сечения прокатываемой полосы на характер дополнительных напряжений применяют набор образцов, сечение которых показано на рис. 9.4. Материал образцов – малоуглеродистая сталь. 2. Влияние контактного трения на дополнительные напряжения изучают при прокатке полосы прямоугольного сечения с надрезами в цилиндрических валках. Форма и размеры образцов показаны на рис. 9.5. Материал образцов – малоуглеродистая сталь или дюралюминий.

3. Для изучения влияния степени деформации на упрочнение металла в процессе холодной прокатки применяют образцы из стали 45 размером $150 \times 30 \times 5$ мм. 4. При выполнении работы используют прокатный стан, прибор для измерения твердости, микрометр и штангенциркуль.

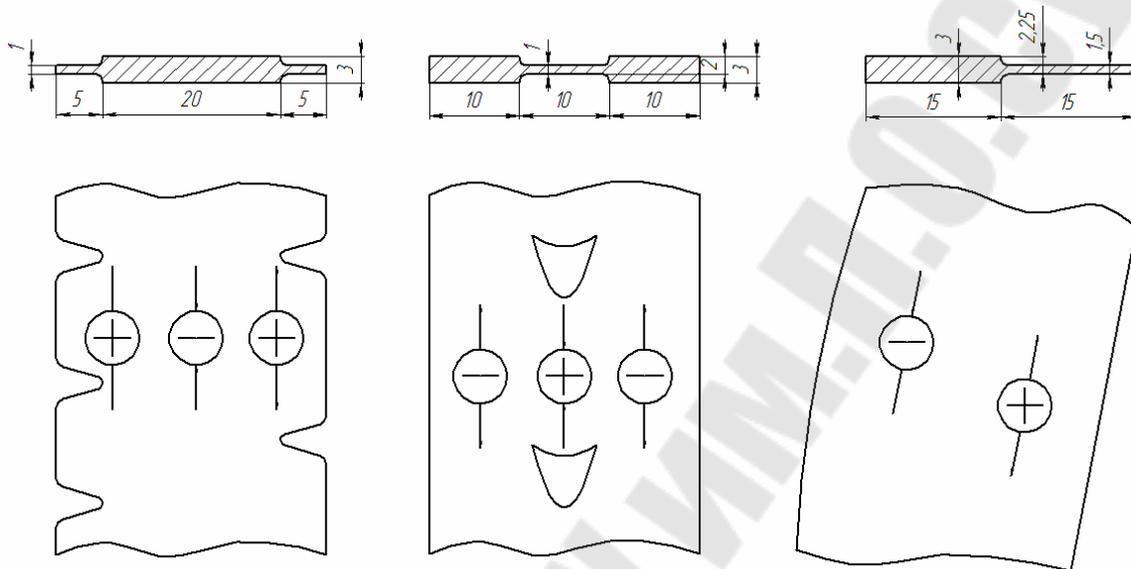


Рис. 9.4. Сечение образцов для изучения влияния формы образца на характер и величину дополнительных напряжений первого рода

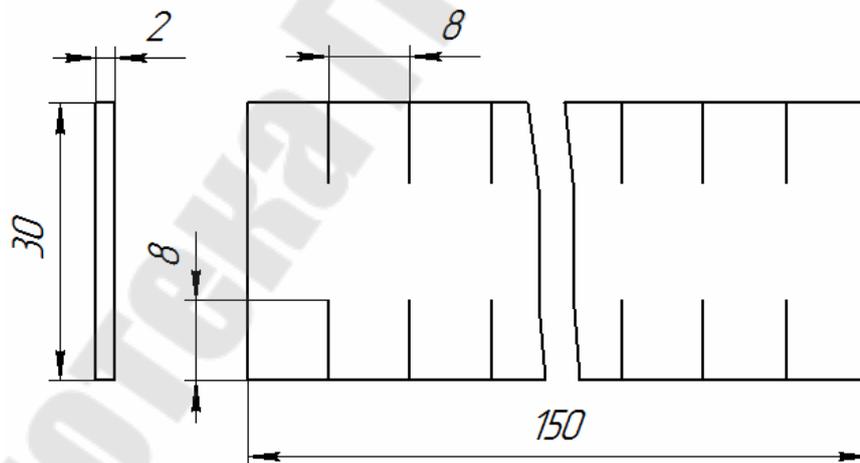


Рис. 9.5. Образец для изучения влияния сил трения на величину дополнительных напряжений первого рода

Выполнение работы. Вначале проводятся опыты по изучению влияния формы исходного сечения полосы (см. рис. 9.4) и контактного трения на дополнительные напряжения первого рода.

Для этого прокатывают полосы в цилиндрических валках с различными степенями деформации, зарисовывают их до и после прокатки, а затем делаются выводы о зависимости величины и знака дополнительных напряжений от условий деформации и формы образца.

При изучении влияния степени деформации на упрочнение прокатывают образцы в цилиндрических валках и после каждого обжатия примерно на 0,5 мм измеряют твердость полосы. Затем строится график зависимости твердости полосы от степени деформации.

По результатам этой части работы делаются выводы о влиянии степени деформации на интенсивность упрочнения металла.

Контрольные вопросы

1. Что такое дополнительные и остаточные напряжения? Причины их появления.
2. Сколько существует родов остаточных напряжений и по какому принципу они делятся?
3. Какое влияние оказывают возникшие остаточные напряжения на металл?
4. Какими методами можно определить величину дополнительных и остаточных напряжений?
5. Методы устранения остаточных напряжений.
6. Изменяется ли величина остаточных напряжений с течением времени?

Лабораторная работа № 10

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ, ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ РАЗРУШЕНИЮ

Продолжительность работы – 2 ч.

Цель работы: ознакомление с методом оценки предельной пластичности металлов, предшествующей разрушению; изучение зависимости пластичности и сопротивления деформации деформируемого образца от его формы.

Пластичность характеризует способность тел к необратимому формоизменению без разрушения в условиях силового воздействия. Под условиями силового воздействия понимается температурно-скоростной режим деформирования, а также характер, интенсивность нагрузки и вид возникающего напряженного состояния. Пластичность зависит не только от схемы главных напряжений, но и их абсолютной величины, характеризующейся средним (гидростатическим) давлением в точке.

Показатели пластичности, как правило, определяют при различных механических схемах деформации, в силу чего они по-разному характеризуют способность металла к формоизменению в тех или иных процессах обработки металлов давлением. Этим обстоятельством и объясняется использование на практике нескольких показателей пластичности.

Из обобщающих показателей схем напряженного состояния наиболее удобным для практического применения является коэффициент жесткости, предложенный Г. А. Смирновым-Аляевым:

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

с точностью до постоянного множителя равный относительному гидростатическому давлению ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_i – интенсивность напряжений).

Указанный коэффициент может иметь как отрицательные значения («мягкие» схемы напряженного состояния), так и положительные («жесткие» схемы): двухосное растяжение (центральная зона выпучиваемой мембраны – $\Pi = 2$; одноосное растяжение – 1; кручение – 0; одноосное сжатие – 1).

Пластичность металла зависит также от формы образца или деформируемой заготовки. Это связано с неравномерным распределением деформаций, а следовательно, и напряжений в деформируемом материале. Поскольку готовое изделие чаще всего отличается от заготовки по форме, в металле в процессе формоизменения возникают дополнительные напряжения. Сопротивление деформации повышается, пластичность металла снижается.

Рассмотрим растяжение образца с выточкой. Вследствие концентрации напряжений у выточек распределение напряжений по ослабленному сечению может быть представлено эпюрой 2 (рис. 10.1, а), где среднее значение напряжения равно пределу текучести σ_T . На рис. 10.1, б показан образец, не имеющий выточек, площадь поперечного сечения которого равна минимальной площади сечения образца с выточкой. Поскольку распределение напряжений по сечению такого образца равномерное, он начинает пластически деформироваться, когда напряжения в нем достигнут σ_T . Первый образец (рис. 10.1, а) начинает деформироваться при значительно большем усилии, когда напряжения в средней его части достигают предела текучести (эпюра 1). Среднее по сечению образца напряжение в этом случае будет σ'_{cp} .

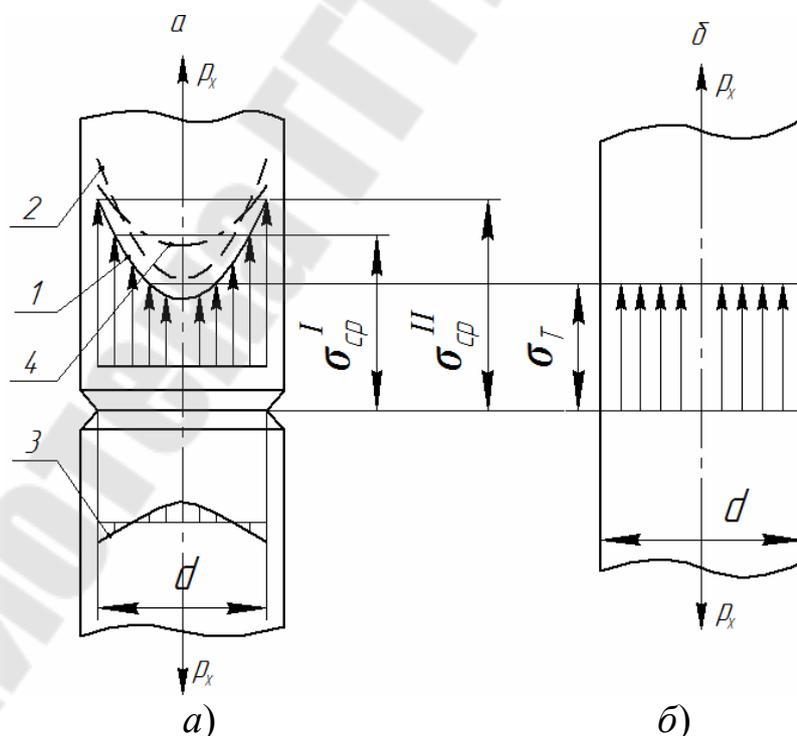


Рис. 10.1. Распределение напряжений в растягиваемом образце:
 а – распределение напряжений в образце с выточками;
 б – распределение напряжений в образце без выточек

Неравномерность распределения напряжений обуславливает появление дополнительных напряжений (эпюра 4). Во внешних слоях образца с большими растягивающими напряжениями (большими удлинениями) возникают сжимающие дополнительные напряжения, а во внутренних, препятствующих растяжению наружных слоев, – растягивающие. В силу целостности образца дополнительные напряжения взаимно уравниваются. Дополнительные напряжения уменьшают неравномерность распределения основных напряжений (эпюра 3), однако среднее напряжение $\sigma''_{\text{ср}}$, определяющее в этом случае сопротивление деформации, возрастает.

При растяжении образца с надрезом наглядно проявляется отрицательное влияние на пластичность материала всестороннего растяжения. Именно такая схема напряженного состояния проявляется в ослабленном сечении деформируемого образца: кроме напряжений растяжения по его оси действуют растягивающие напряжения, нормальные к оси образца. Последние появляются в результате того, что менее деформирующиеся части образца препятствуют деформации сжатия объема металла в месте надреза. Схема всестороннего растяжения характеризуется низкой пластичностью материала и требует для реализации больших усилий деформирования, поэтому ее практически не применяют. Она наблюдается в отдельных частях деформируемого тела при некоторых процессах обработки давлением. Часто здесь роль надрезов играют дефекты структуры, хрупкие включения, трещины, волосовины.

Отрицательное влияние надреза тем больше, чем он глубже, тоньше и меньше радиус закругления в его вершине. Изменяя форму надреза (варьируя геометрию выточки), можно при растяжении образцов с надрезом получать различные значения $d_{\text{ш}}/R_{\text{ш}}$ (диаметр и радиус скругления дна выточки после разрушения) и тем самым различные показатели жесткости схемы напряженного состояния при разрушении. Основным геометрическим параметром выточки является отношение диаметра сечения с минимальной площадью в месте выточки образца к радиусу кривизны контура выточки в плоскости меридионального сечения образца d_0 / R_0 (рис. 10.2). Отношение d_0 / R_0 определяет отношение $d_{\text{ш}}/R_{\text{ш}}$.

Различная функциональная связь этих отношений для разных материалов определяется экспериментально. Для латуни Л62 $d_{\text{ш}}/R_{\text{ш}} = 0,52d_0 / R_0$. С учетом этого соотношения уравнение связи геометрического пара-

метра вытяжки с показателем схемы напряженного состояния в момент разрушения растягиваемого образца из латуни Л62 имеет вид

$$\Pi = 1 + 0,39d_0/R_0, \text{ или } \Pi = 1 + 3\ln(1 + 0,13d_0/R_0).$$

Используя эти зависимости, нетрудно заранее установить геометрические характеристики выточки, чтобы получить желаемое значение коэффициента жесткости напряженного состояния при разрушении.

Деформация, предшествующая разрушению, определяется по формуле

$$\varepsilon_p = 2\ln(d_0/d_{\text{ш}}).$$

Материалы, инструмент, оборудование. Для проведения работы необходимы: стальные образцы для испытаний на растяжение, форма и размеры которых показаны на рис. 10.3; образцы из латуни Л62 с разной формой выточки (см. рис. 10.2); универсальная испытательная машина; штангенциркуль и микрометр.

Выполнение работы. Образцы с надрезом и без надреза подвергают растяжению на испытательной машине с записью индикаторных диаграмм. Путем последующего замера образцов и обработки индикаторных диаграмм определяют полное относительное удлинение, предел текучести и предел прочности для обоих типов образцов.

По результатам обработки экспериментальных данных при растяжении латунных образцов с различной формой выточки строят диаграмму зависимости «предельно прочной пластичности» (степень деформации ε_p , предшествующая разрушению) от показателя схемы напряженного состояния (критерия жесткости Π). В заключение делают выводы по работе.

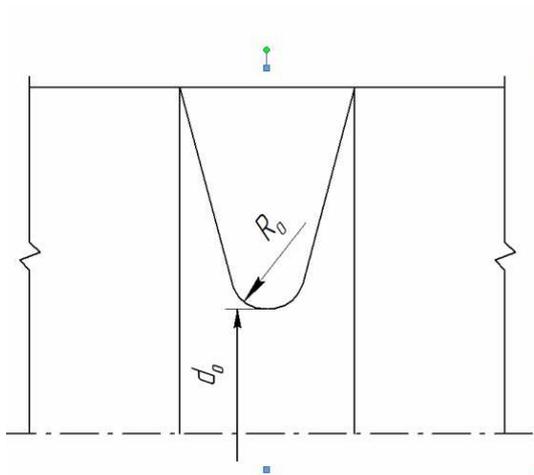


Рис. 10.2. Форма выточки цилиндрического образца

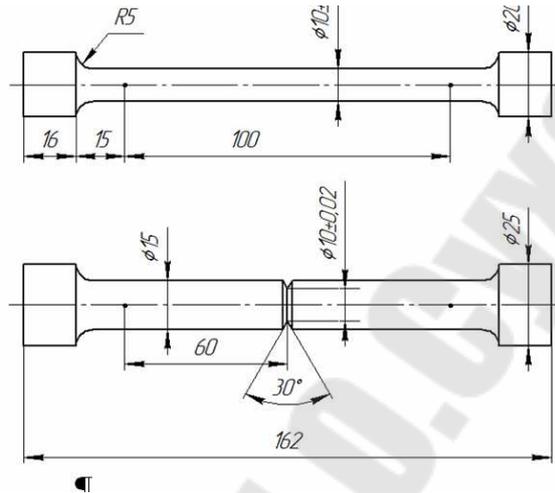


Рис. 10.3. Образцы для определения пластичности и сопротивления деформации материала при растяжении

Контрольные вопросы

1. Чем определяется пластичность материала?
2. Перечислите показатели пластичности.
3. Как определяется коэффициент жесткости? Показателем чего он является?
4. Чем отличается растяжение образца с выточкой и без выточки? Какой образец будет обладать большим сопротивлением деформированию и меньшей пластичностью?
5. Как получить желаемое значение коэффициента жесткости напряженного состояния при разрушении?

Литература

1. Иванов, И. И. Основы теории обработки металлов давлением / И. И. Иванов, А. В. Соколов, В. С. Соколов. – М. : Форум : Инфра-М, 2007. – 144 с.
2. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением : учеб. для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1971. – 423 с.
3. Смирнов, В. С. Теория обработки металлов давлением / В. С. Смирнов. – М. : Metallurgia, 1973. – 423 с.
4. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – СПб. : Наука, 2008. – 527 с.
5. Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М. : Metallurgia, 1978. –
6. Смирнов, В. С. Сборник задач по обработке металлов давлением / В. С. Смирнов. – М. : Metallurgia, 1973. – 192 с.
7. Гун, Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности) : учеб. пособие для вузов / Г. Я. Гунн. – М. : Metallurgia, 1980. – 455 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ	3
Общие указания по проведению измерений в процессе формоизменения	4
<i>Лабораторная работа № 1. Изучение внутрикристаллических линий сдвигов</i>	6
<i>Лабораторная работа № 2. Изучение линий текучести.....</i>	12
<i>Лабораторная работа № 3. Построение кривой истинных напряжений в деформируемом металле</i>	17
<i>Лабораторная работа № 4. Изучение влияния температуры на пластичность и сопротивление металла деформированию</i>	23
<i>Лабораторная работа № 5. Изучение зависимости пластичности материала от вида напряженного состояния.....</i>	29
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование контактного трения при обработке металлов давлением.....</i>	34
<i>Лабораторная работа № 7. Исследование распределения нормальных контактных напряжений при открытом осаживании заготовок</i>	44
<i>Лабораторная работа № 8. Экспериментальное изучение закона наименьшего сопротивления при обработке металлов давлением.....</i>	50
<i>Лабораторная работа № 9. Анализ характера действия дополнительных и остаточных напряжений при прокатке</i>	54
<i>Лабораторная работа № 10. Оценка предельной пластичности металлов, предшествующей разрушению</i>	60
Литература	65

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Агунович Ирина Валентиновна

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Практикум

**по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине для студентов
специальностей 1-36 01 05 «Машины и технология
обработки материалов давлением», 1-42 01 01
«Металлургическое производство
и материалобработка (по направлениям)»
специализации 1-42 01 01-02 01
«Обработка металлов давлением»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор
Компьютерная верстка

Т. Н. Мисюрова
И. П. Минина

Подписано в печать 04.03.19.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 4,35.

Изд. № 1.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель