

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ПРОЦЕССОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ, УПРОЧНЕНИЯ
И РАЗРУШЕНИЯ
РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания к изучению раздела
«Экспериментальные исследования
физико-механических характеристик различных
материалов» курса «Сопротивление материалов»

Тольятти 1984

Министерство высшего и среднего специального образования

Р С С Р

Тольяттинский политехнический институт

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, УПРОЧНЕНИЯ
И РАЗРУШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к изучению раздела "Экспериментальные
исследования физико-механических характеристик различных
материалов" курса "Сопротивление материалов".



УДК 620178

Рассмотрены вопросы повышенной сложности раздела "Экспериментальные исследования физико-механических характеристик различных материалов" курса "Сопротивление материалов".

Содержатся данные по структуре материалов, оказывающей существенное влияние на механизмы процессов деформации и разрушения.

Составитель Эпштейн Л.Е.

Ответственный за выпуск проф. докт. техн. наук Кристал М.А.

Утверждено на заседании секции общинженерных дисциплин методического совета института в качестве методических указаний.

I. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

I.1. Понятие о механизме процессов упругой и пластической деформации при растяжении пластических материалов

Механические характеристики различных материалов определяются экспериментально при помощи испытательных машин на специально изготовленных образцах, подвергнутых различным видам нагружений. Для рассмотрения феноменологических особенностей протекания упругих и пластических деформаций необходимо иметь общее представление о механизме этих процессов, происходящих в материале под действием внешних сил, а также знать, от каких факторов — особенностей структуры и нагружения — зависят упругость и пластичность. Изучением этих вопросов занимается физика твердого тела, так как процессы, имеющие место в материале при деформации и разрушении, определяются структурой вещества и принципиально не могут быть объяснены средствами механики сплошной среды.

В инженерной практике прочностные характеристики металлов определяются следующими пределами напряжений: упругости — σ_y , пропорциональности — $\sigma_{ли}$, текучести — σ_T , прочности — σ_B . Перечисленные прочностные характеристики называются техническими и для одного и того же материала зависят от точности испытательной машины. Рассмотрим различные стадии нагружения.

Напряжение до предела пропорциональности на диаграмме растяжения будет выражаться прямолинейной зависимостью, что соответствует закону Гука. В механике принято считать, что до предела упругости в образце наблюдаются только упругие (обратимые) деформации. Выше этого предела появляются пластические (необратимые) деформации. Изучение изменения структуры металлов при деформировании

ним показывает, что первые пластические сдвиги наблюдаются значительно раньше технического предела упругости.

Когда же появляются первые пластические деформации, какому напряжению они соответствуют и от чего они зависят?

Рассмотрим поведение металлов при растяжении и механизм их упругих и пластических деформаций.

Металлы, как известно, это твердые тела, имеющие кристаллическую структуру, технические металлы — поликристаллическую, т.е. состоящую из многих кристаллов (зерен), каждый из которых имеет размер порядка десятков микрометров и кристаллографическую ориентировку плоскостей, отличающуюся от ориентировки соседних зерен (рис. 1). В кристаллической решетке, благодаря межатомным связям, атомы расположены в строго определенном порядке (рис. 2). Упругие характеристики металла определяются величиной межатомной связи, которая оказывает влияние и на прочность металлов.

При растяжении наблюдаются сдвиги по кристаллографическим плоскостям в отдельных зернах и поворот образовавшихся пачек скольжения к линии действия силы (рис. 3). В области чисто упругой деформации сдвиги не проявляются, т.е. упругая деформация кристаллической решетки связана с обратимым изменением межатомных расстояний, полностью устраняющимся после снятия нагрузки.

Известно, что каждый сдвиг осуществляется на одно межатомное расстояние $\alpha \approx 10^{-8} \text{ см}$. Испытательная машина высокой точности по удлинению имеет точность $\sim 10^{-3} \text{ см}$; тогда число сдвигов n приблизительно может быть найдено как отношение этих величин, т.е. $n \approx 10^{-3} / 10^{-8} \approx 10^5$, а при точности испытательной машины $\sim 10^{-2} \text{ см}$ (имеющейся на кафедре Сопротивления материалов в ТИИ) число сдвигов $\sim 10^6$. Это достаточно малое число сдвигов в сравнении с реализуемыми при лавинной деформации, соответствующей пределу текучести — σ_T .

Фактически первые пластические деформации, как уже было отмечено, начинаются существенно раньше, поэтому, кроме технического предела упругости — σ_y , различают еще и так называемый физический

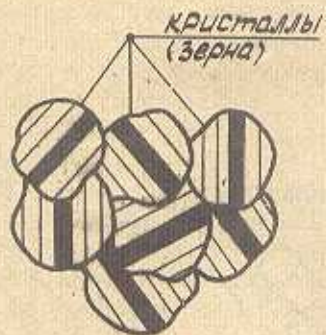


Рис. 1. Кристаллографическая ориентировка плоскостей отдельных зерен

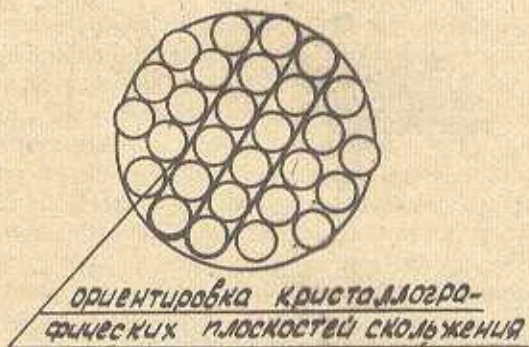


Рис. 2. Упаковка атомов по кристаллографическим плоскостям отдельного кристалла (зерна)

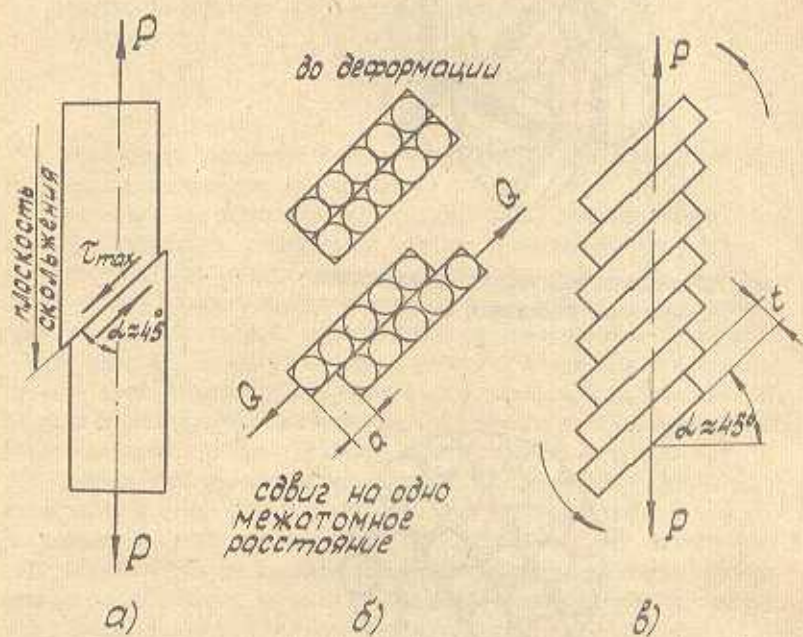


Рис. 3 Механизм деформирования при растяжении:
 а) первый сдвиг по кристаллографическим плоскостям скольжения при τ_{max} ,
 б) атомистическая схема сдвига при образовании пачки скольжения,
 в) образование пачек скольжения при сдвиге и их поворот, приводящий к уменьшению угла $90-\alpha$.

ческий предел упругости σ_y' , соответствующий первым сдвигам (рис. 4). Например: физические пределы упругости и текучести для малоуглеродистой стали Ст-3 соответствуют первому сдвигу и составляют $\sim 6,0$ МПа, а технический предел упругости, в соответствии с показаниями испытательной машины, — $\sigma_y \approx 180$ МПа, т.е. в 30 раз больше, чем физический.

Следовательно, технические σ_y и σ_T , появляются после большого числа сдвигов $\sim 10^5$ (в 10^5 плоскостей). Так как сдвиги приводят к упрочнению металла, то технические σ_y и σ_T много больше физических пределов упругости и текучести, соответствующих первому сдвигу. Чем точнее испытательная машина, тем меньше это различие и тем короче получается прямолинейный участок упругой области, соответствующий закону Гука на диаграмме растяжения.

В каких зернах появляются первые сдвиги и как идет развитие и накопление пластических деформаций ?

Практически при растяжении, т.е. линейном напряженном состоянии, первые сдвиги происходят в зернах, ориентированных кристаллографическими плоскостями сдвига под углом, близким к 45° , по отношению к линии действия силы P , так как под этим углом действуют наибольшие касательные напряжения — τ_{\max} . Сдвиговые деформации сопровождаются образованием пачек скольжения и их поворотами, т.е. деформация металла (удлинение образца с одновременным сужением) связана с изменением ориентации отдельных зерен по отношению к линии действия силы. По мере увеличения силы и развития сдвиговых деформаций (рис. 3) ориентация кристаллографических плоскостей различных зерен стремится измениться, постепенно приближаясь к углу 45° по отношению к линии действия этой силы. Предел текучести проявляется тогда, когда в большинстве зерен, ориентированных благоприятной плоскостью скольжения под углом, близким к 45° к линии действия силы, одновременно проявляется пластический сдвиг. При этом деформация, т.е. течение материала, происходит практически без возрастания нагрузки, а иногда даже и при некотором ее снижении. Технический предел текучести — σ_T

выявляется после 10^5 или 10^6 элементарных сдвигов, что зависит от точности испытательной машины.

В некоторых сталях предел текучести проявляется после разрушения сетки цементита по границам ферритных зерен, что приводит к лавинной деформации одновременно во многих ферритных зернах без возрастания нагрузки. Это обуславливает появление площадки текучести на диаграмме растяжения. Схематическое изображение структуры такого металла показано на рис.5. Чем больше в стали углерода, тем больше перлита, тем меньше феррита и короче площадка текучести.

В сплавах типа малоуглеродистой стали или дюралюминия, имеющих относительно легкоподвижную примесь (атомы углерода в стали, атомы магния в дюралюминии), предел текучести часто связан с закреплением такими атомами отрезков краевых дислокаций и отрывом этих отрезков от них при деформации²⁸ (рис.6) По мере возрастания напряжения от нуля до σ_3 (позиция 1, 2 и 3) упругие деформации постепенно увеличиваются, последовательно достигая значений ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 . Эту зависимость можно представить на диаграмме растяжения $\sigma = f(\epsilon)$ (рис.7). Начиная от σ_3 и далее, происходит отрыв дислокации, что соответствует появлению пластических (необратимых) деформаций ϵ_4 и ϵ_5 , т.е. началу площадки текучести и пределу текучести - σ_T . Дальнейшее перемещение краевой дислокации и выход ее на поверхность приводит к образованию ступеньки сдвига в кристаллической решетке (рис. 3,б).

При достижении предела текучести и при дальнейшем увеличении нагрузки напряжения вновь начинают расти, достигая своего наибольшего значения, соответствующего пределу прочности - σ_B .

С чем связан дальнейший рост напряжений и как разрушаются пластичные материалы?

Достижение предела текучести приводит к большой неоднородности деформирования. Сначала деформация развивается в благоприятно ориентированных зернах, т.е. близких к углу 45° к линии действия

²⁸ Дислокация - область направленного расположения атомов в кристаллической решетке, отличающаяся высокой подвижностью в поле напряжения по кристаллографическим плоскостям решеток.

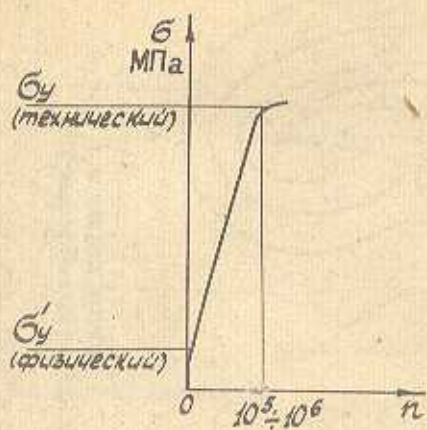


Рис.4. Технический и физический пределы текучести



Рис.5 Схематическое изображение структуры малоуглеродистой стали

за кривые
отмбл

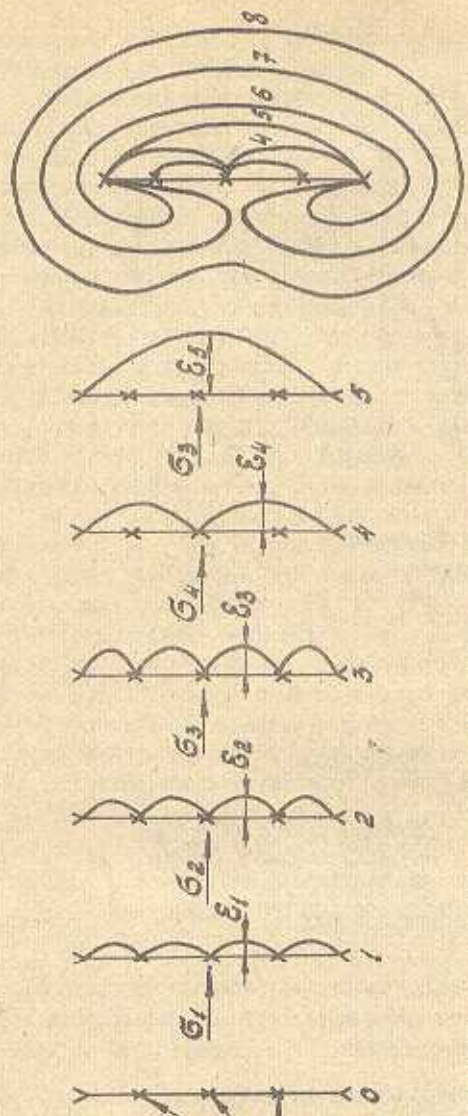


Рис. 6. Последовательные этапы деформирования и отрыва отрезков кривой дислокации:

- 0 - кривая дислокации до нагружения; 1, 2, 3 - упругое нагружение;
- 4, 5 - пластическое нагружение в результате отрыва отрезков кривой дислокации;
- 6 - сталь отрыва петель дислокации от отрезков в конце пластичности текучести.

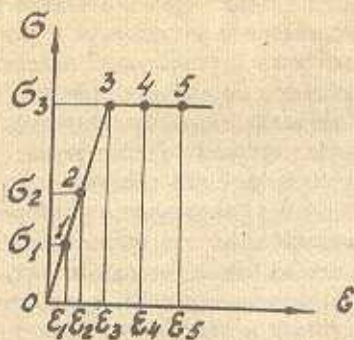


Рис. 7 Схематизированная диаграмма напряжений краевой дислокации

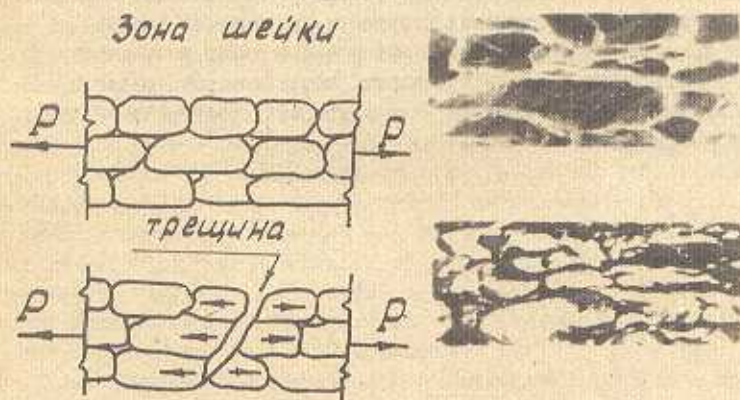


Рис. 8 Разрушение материала (металла) в зоне шейки:
 а) схема роста трещины;
 б) вытянутые зерна под микроскопом стали СТ-3

силы. Затем пластичность таких отдельных зерен постепенно уменьшается и исчерпывается, что выражается в затруднении в них повторных сдвигов в результате искажения (искривления) кристаллографических плоскостей и образования при деформации дефектов кристаллической решетки. Пересориентация таких зерен вызывает деформацию соседних с ними менее благоприятно ориентированных зерен, что делает их ориентацию более благоприятной для развития пластической деформации. Нагрузка несколько растет, наблюдаются повторные сдвиговые деформации, зерна вытягиваются, и в области конца площадки текучести в наиболее слабых местах возникает микроразрушения — деструкция металла, т.е. нарушается межатомная связь и появляются микротрещины. В районе концов микротрещины создаются области концентрации напряжений, приводящие к ускоренному разрушению (рис. 8).

Процесс деструкции материала ведет к его ослаблению и, следовательно, конкурирует с процессом упрочнения материала (особенно в местах, где еще нет микротрещин), развивающимся за счет наклепа. При нагружении после достижения текучести превалирует второй фактор и прочность деформируемого материала в целом возрастает вплоть до достижения предела прочности, после которого резко возрастает роль первого фактора, что приводит к разупрочнению и быстрому разрушению.

1.2. Пластическое и хрупкое разрушение

Известно, что в процессе испытаний различных материалов на растяжение, разрушение в месте излома может быть различным и зависит от пластичности. Для пластичного материала, например, малоуглеродистой стали, характерно пластическое (вязкое) разрушение (рис. 9, а), для хрупкого материала, например, чугуна — хрупкое (рис. 9, б).

При вязком разрушении на разорванных частях образца возникает кратер и конус. Угол между осью и образующей конуса составляет 45° , что свидетельствует о существенной роли сдвига от действия максимальных касательных напряжений в зоне шейки.

При хрупком разрушении разделение образца на две части происходит от отрыва одной части от другой по сечению, ориентированному перпендикулярно к оси, где действует максимальные нормальные напряжения.

Деление материалов на пластичные и хрупкие носит достаточно условный характер, так как в некоторых случаях хрупкие материалы получают пластические свойства и, наоборот, пластичные материалы становятся хрупкими. Например, мягкая сталь при низкой температуре разрушается, как хрупкий материал, и так называемые твердые стали разрушаются без образования шейки с характерным хрупким изломом. Кроме того, нельзя судить о материале при визуальном наблюдении его излома, если неизвестно напряженное состояние, при котором произошло разрушение. Поэтому правильнее говорить не о пластичных и хрупких материалах, а об их пластическом и хрупком разрушении. Наиболее достоверные данные получаются в результате микроскопических исследований излома при помощи длиннофокусного электронного микроскопа — "Стереоскана".

Любое разрушение связано с возникновением и развитием трещин, т.е. с разрывом межатомных связей. Длина минимально возможного "шага" трещины называется квантом разрушения и зависит от свойств материала и условий разрушения. При рассмотрении излома при увеличении в несколько сот, а иногда и тысяч раз можно наблюдать вязкое и хрупкое разрушение.

Вязкое (пластическое) разрушение сопряжено с большой пластической деформацией, предшествующей разрушению и сопровождающей его. При этом трещина перемещается квантами разрушения, соответ-

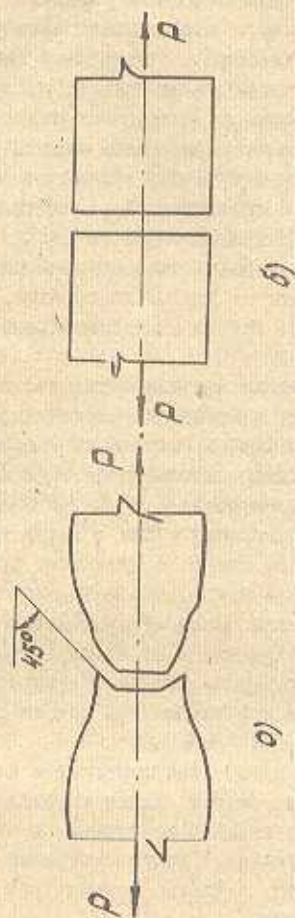
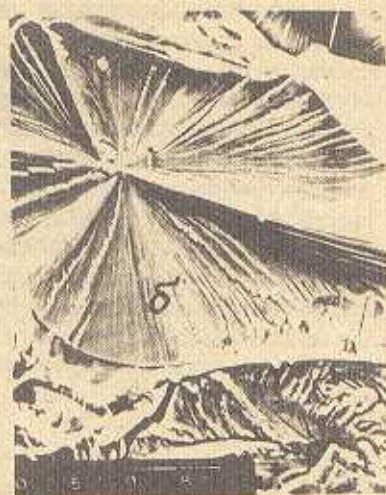


Рис. 9. Разрушение пластичного и хрупкого материалов:
 а - пластичное разрушение,
 б - хрупкое разрушение



x 3000

a)



x 3000

б)

а) вязкая трещина



зона наклепа у конца трещины

б) хрупкая трещина



Рис.10. Виды разрушения в местах излома:

- а - микроснимок и схема вязкого разрушения (чашевидный излом),
- б - микроснимок и схема хрупкого разрушения (лучистый излом)

ствующими по порядку величины 10, 100, 1000 и более межатомных расстояний с существенными задержками. На конце перемещающейся трещины металл упрочняется, что способствует изменению направления квантов разрушения и получению неориентированных микронадрезов материала на поверхности разрушения. В связи с этим вязкий излом имеет чашевидное микростроение (рис. 10,а).

Хрупкое разрушение происходит без заметных пластических деформаций. Хрупкая трещина почти атомарно остра и перемещается практически без задержек квантами разрушения, соответствующими величине порядка межатомного расстояния. На поверхности разрушения получают микронадрезы, ориентированные в направлении продвижения начальной зародившейся трещины. В связи с этим хрупкий излом имеет лучистое микростроение (рис. 10,б).

1.3. Влияние химического состава и способа обработки стали на вид диаграммы растяжения

Для малоуглеродистой стали типа Ст-3 и некоторых цветных металлов характерно наличие ярко выраженной площадки текучести на диаграмме растяжения. Сталь типа Ст-3, рис. II диаграмма 1, имеет предел текучести $\sigma_T \approx 240$ МПа, относительное остаточное удлинение $\delta \approx 21...23\%$ и относительное остаточное сужение $\psi \approx 60...70\%$, что типично для мягкой стали.

Рассмотрим диаграммы растяжения некоторых других сталей и сравним их со сталью Ст-3. Вид диаграммы растяжения может резко измениться в зависимости от

- а) способа ее изготовления;
- б) вида обработки - наклепа, термической обработки и т.п.;
- в) содержания углерода;
- г) содержания легирующих элементов.

На диаграмме растяжения 2 (рис. II) показана малоуглеродистая сталь Ст-3, прошедшая упрочнение вытяжкой в результате наклепа. Как видно, предел пропорциональности $\sigma_{пц}$ и предел текучести σ_T повысились, предел прочности σ_B почти не изменился, а пластичность - $\epsilon_{ост}$ - стала меньше. В случае необходимости сильного повышения предела прочности, сталь протягивает через фильеры. Возможные варианты вытяжки при волочении (рис. I2, а) и прессовании (рис. I2, б).

В углеродистых сталях увеличение концентрации углерода приводит к повышению σ_T и σ_B и уменьшению δ и ψ , сталь при этом становится более хрупкой, например, среднеуглеродистая сталь марки Ст-6 имеет $\sigma_B \approx 600$ МПа, $\sigma_T \approx 310$ МПа, $\delta \approx 12...15\%$ (рис. II, диаграмма 3).

Для создания высокопрочной стали с достаточно большими δ и ψ при выплавке вводят в ее состав легирующие элементы - медь, никель, хром, кобальт и др. Такие стали называют легированными; например, (рис. II) хромокремнемарганцевая сталь марки 30ХГ2С имеет $\sigma_B \sim 900$ МПа, $\sigma_T \sim 600$ МПа и $\delta \sim 13\%$ (диаграмма 4). Легирующие элементы облегчают закалку стали, увеличивая ее прокаливаемость. Это дает возможность иметь после специальной термической обработки существенно улучшенную структуру и механические



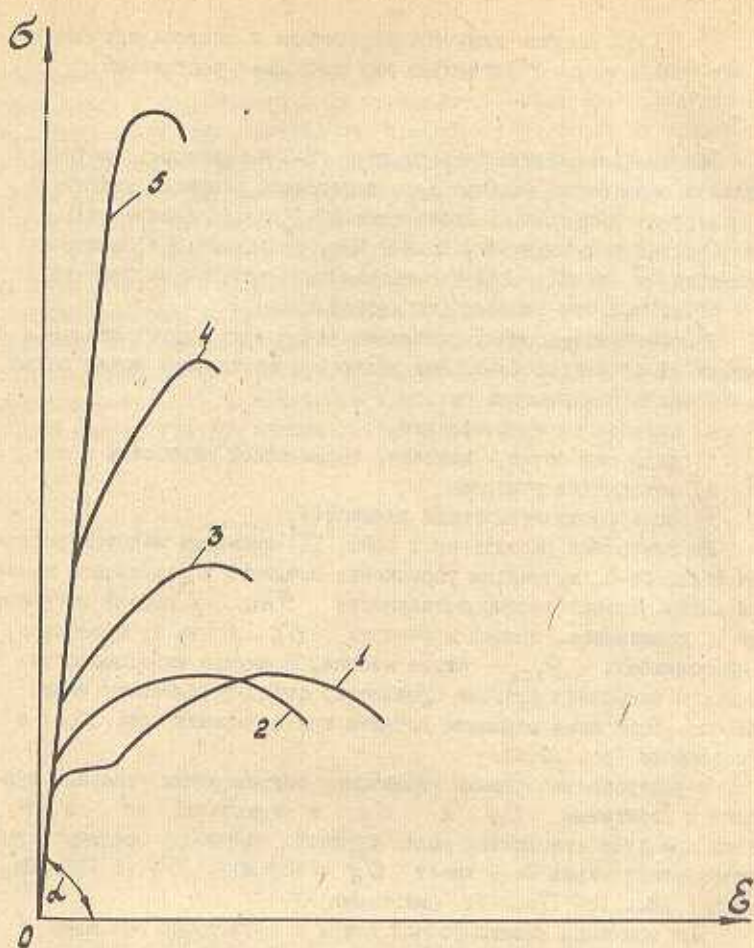


Рис. II. Диаграммы растяжения различных сталей:

- 1 - малоуглеродистая,
- 2 - малоуглеродистая, подвергнутая наклепу,
- 3 - среднеуглеродистая,
- 4 - легированная,
- 5 - термически обработанная (закаленная и низкоотпущенная)

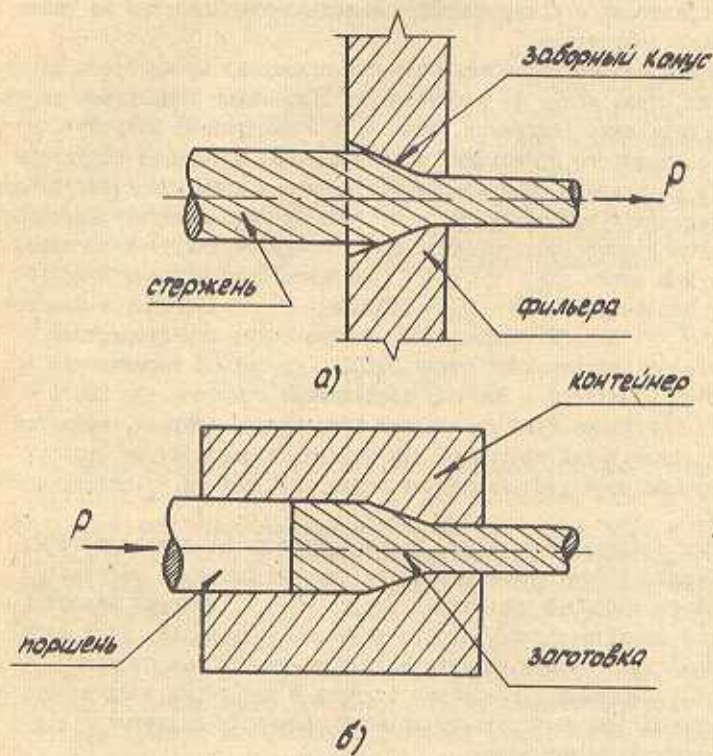


Рис.12. Возможные способы вытяжки стали:

- а - при волочении,
- б - при прессовании

свойства стали. Даже без такой обработки, в результате обычного охлаждения после прокатки, в легированной стали, по сравнению с углеродистой, возрастает содержание перлита и уменьшается соответственно количество феррита. Сталь делается более мелкозернистой в сравнении с углеродистой и механические свойства ее также несколько возрастают.

В случае необходимости большого повышения прочностных характеристик, сталь после ее изготовления и прокатки подвергает термической обработке (например, закалке и последующему отпуску), в процессе которого происходит принципиальное изменение структуры стали в результате образования мартенсита и продуктов его распада, что приводит к существенному искажению кристаллической решетки и повышению прочностных характеристик: пределов текучести и прочности. При этом σ_B и σ_T оказывается более близкими по своему значению, т.е.: $\sigma_B \sim 1400 \text{ МПа}$, $\sigma_T \sim 1200 \text{ МПа}$, а пластичность $\delta \sim 6...8\%$. Приведенные механические характеристики относятся к легированной стали 30ХГ2С, прошедшей термическую обработку - закалку с 900°C с последующим отпуском при 200°C (рис. II диаграмма 5). С изменением температуры отпуска, меняются механические характеристики. При повышении температуры отпуска прочностные свойства закаленной стали уменьшаются, а пластические растут.

Для среднеуглеродистых, высокоуглеродистых и легированных сталей (рис. II, диаграммы 3 и 4), не имеющих площадки текучести, определяют условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, который является основной характеристикой прочности таких материалов. Если легированная сталь прошла закалку с низкотемпературным отпуском (рис. II, диаграмма 5), ее можно отнести к категории твердых сталей, для которых основной характеристикой прочности является σ_B , как у хрупких материалов.

Все приведенные диаграммы имеют почти одинаковый угол наклона к оси абсцисс, что свидетельствует о постоянстве модуля упругости E .

1.4. Понятие о механизме процессов разрушения хрупких материалов

1. Разрушение чугуна

Чугун имеет металлическую основу, состоящую из феррита, феррита и перлита, перлита или перлита и цементита (рис. 13). Металлическую основу чугуна повсеместно прорезают графитные включения, которые являются концентраторами напряжений. В процессе приложения внешней силы при испытании на центральное растяжение или сжатие излом происходит по графитным включениям с разрушением их соединяющих металлических перемычек.

2. Разрушение бетона

Бетон состоит из заполнителей, например, крупного щебня или гравия и мелкого песка, вяжущего, это различные виды цемента, и воды. При твердении все компоненты бетона соединяются в монолит (рис. 14). При этом в массиве бетона, между крупными фракциями заполнителя, образуются микротрещины за счет объемных эффектов при неравномерной усадке, обусловленной уменьшением объема. Трещины также возникают за счет уменьшения влаги при высыхании бетона. Кроме того, крупные фракции заполнителя, например щебень, создают на своих краях концентрации напряжений, намечающие пути развития трещин. Разрушение бетона под воздействием внешней нагрузки происходит от накапливания и развития трещин, перемещающихся по связке в основном между крупными фракциями заполнителя.

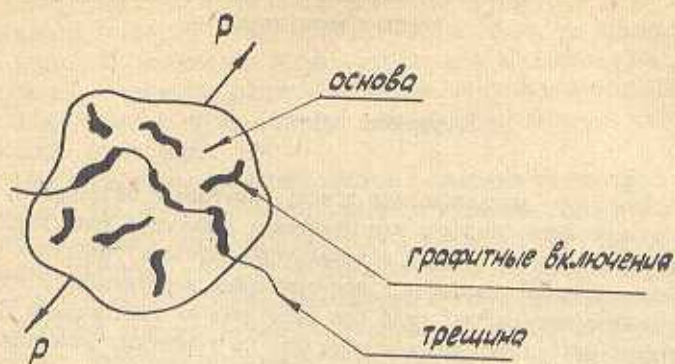


Рис.13. Разрушение чугуна

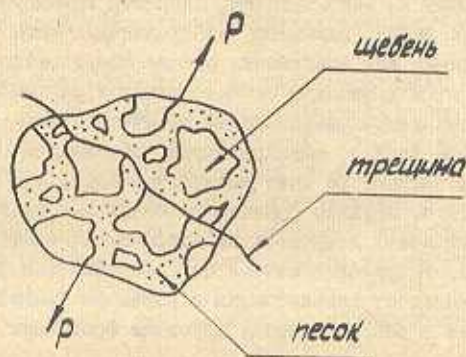


Рис.14. Разрушение бетона

1.5. Поведение пластичных и хрупких материалов при повторном нагружении

1. Физическая природа наклепа

Изменение свойств металла в результате предварительного нагружения выше предела текучести называется наклепом.

После повторного растягивающего нагружения сталь упрочнилась (рис. II, диаграмма 2). Этот вид наклепа является полезным* и может быть использован в технике с целью упрочнения тросов и цепей грузоподъемных машин, проводов, арматурной стали железобетона и т.д. Упрочнение стали при наклепе в результате предварительного растяжения обусловлено сдвиговыми деформациями и поворотами кристаллографических плоскостей зерен, приводящими к искажению кристаллической решетки и заклиниванию плоскостей скольжения. В связи с этим при повторном нагружении затрудняется пластическая деформация и повышаются пределы пропорциональности и текучести. Предел прочности в данном случае почти не изменяется, поскольку эта величина связана с хрупким разрушением, энергии которого мало изменяется в ходе деформации при одноосном (центральном) растяжении.

Предварительное растяжение, применяемое с целью упрочнения стали, является самым невыгодным напряженным состоянием. Так как в упруго-пластической области — зоне упрочнения — образуются микротрещины в связи с нарушением межатомных связей. В случае необходимости сильного повышения предела прочности сталь протягивают через фильеры (рис. 12), что приводит в результате деформации к образованию объемного или плоского напряженных состояний. При этом количество микротрещин будет гораздо меньше и не создаются условия для их развития, т.е. всестороннее или частичное обжатие препятствует нарушению межатомных связей и тем самым повышает предел прочности.

* вредным — при пробивке отверстий под заклепки, так как материал у краев отверстия охрупчивается, что способствует появлению микротрещин, опасных при эксплуатации.

При работе бетона в сжатых конструкциях, деформации его обычно бывают упруго-пластическими. Если нагрузить образец от нуля до силы P_1 и разгрузить (рис. 15,а), то пластическая деформация на диаграмме сжатия определяется отрезком OO_1 , а упругая — O_1N_1 . Как видно, нагрузка будет упруго-пластическая, а разгрузка упругая.

При повторных нагружениях от нуля до силы P_1 происходит накопление пластических деформаций $OO_1, O_1O_2, O_2O_3, O_3O_4$ и т.д., прирост которых при последующих нагрузках уменьшается и стремится к нулю при числе нагружений n (рис. 15,б). Здесь так же, как и на рис. 15,а, разгрузка упругая, с постоянным углом наклона ($\operatorname{tg} \alpha = E = \text{const}$, так как $O_1N_1 \parallel O_2N_2 \parallel O_3N_3$ и т.д.).

Кривая, показывающая изменение полной пластической деформации — OO_n в зависимости от числа нагружений — N , полученная при последнем n нагружении, приведена на рис. 16. По оси абсцисс отложено число нагружений, по оси ординат $\Delta \mathcal{E}_{pl}$ — пластические деформации. Как видно, при повторных нагрузках до одного и того же напряжения в бетоне накапливаются пластические деформации. Если в результате воздействия на образец повторных сжимающих нагрузок этот образец получил остаточную деформацию, близкую к предельной, то диаграмма сжатия такого бетона стремится к идеально упругой. Это означает, что такой "приспособившийся" пластически обработанный бетон после снятия нагрузки не будет иметь пластических деформаций даже при многократных циклах нагружения и может работать длительное время не разрушаясь.

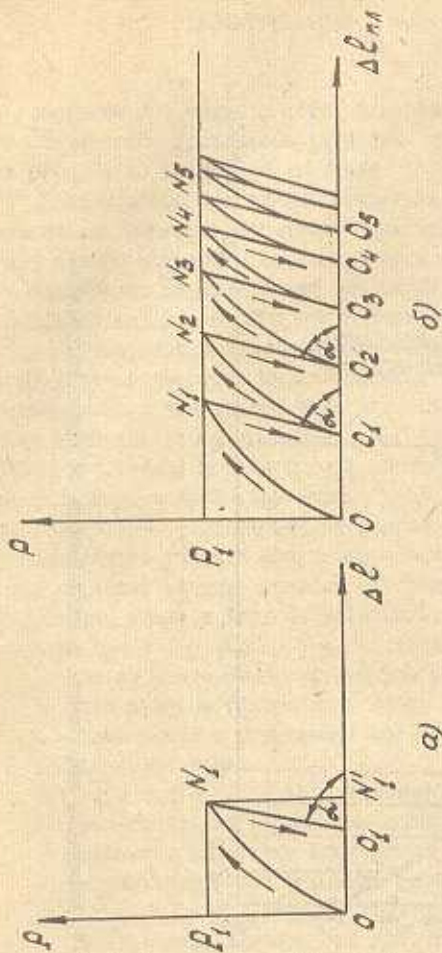


Рис. 15. Кривые изменения пластических деформаций в зависимости от напряжений:
 а - при единичном нагружении и разгрузке,
 б - при повторных нагружках и последующих разгрузках

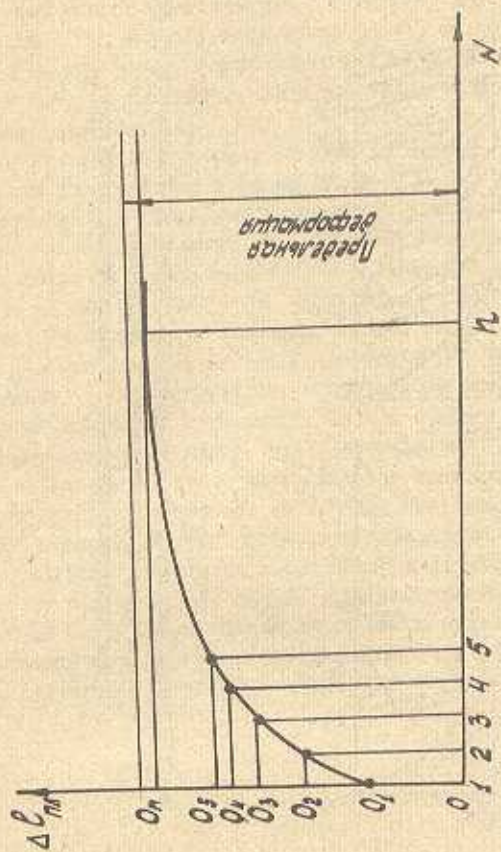


Рис. 16. Изменение деформации в зависимости от числа нагружений

1.6. Влияние скорости нагружения на механические характеристики и модуль упругости материала

Большинство задач в строительстве и машиностроении решается при статическом приложении нагрузок, т.е. их медленном возрастании от нуля до конечного значения.

Если процесс нагружения протекает в короткий промежуток времени, то пластические деформации не успевают полностью развиться и для одного и того же материала происходит изменение прочностных и пластических характеристик. На рис. 17 показаны диаграммы растяжения пластичной стали СТ-3 при статическом (диаграмма 1) и динамическом (например, удар) (диаграмма 2). При увеличении скорости нагружения прочностные характеристики стали растут, а пластические уменьшаются, в результате чего пластичный материал по своим свойствам приближается к хрупкому (рис. 17). Рассмотрим, как изменяется модуль упругости, в зависимости от скорости и вида нагружения. Как известно, модуль упругости E на диаграмме растяжения, где $\sigma = f(\epsilon)$, определяется тангенсом угла наклона α прямолинейного участка диаграммы к оси абсцисс. На рис. 18 схематически показаны упругие участки диаграммы для случаев статического нагружения, удара и упругих колебаний:

- а) $E_{ст} = tg \alpha_{ст}$ - статический, или релаксированный, или же изотермический, модуль упругости. Определяется при статическом растяжении, когда образец находится в тепловом равновесии с окружающей средой. При расчетах $E_{ст}$ обозначается как E ;
- б) $E_g = tg \alpha_g$ - динамический модуль, измеряемый при колебательных процессах, является тангенсом угла наклона оси динамической петли гистерезиса в координатах $\sigma = f(\epsilon)$; используется при расчетах резонансных систем;
- в) $E_{g1} = tg \alpha_{g1}$ - нерелаксированный, или адиабатический модуль определяется при ударе, т.е. очень быстром нагружении, когда образец не успел еще обменяться теплом с окружающей средой.

В курсе сопротивления материалов с целью упрощения расчета принято допущение о равенстве статического и динамического модулей упругости, т.е. $E_{ст} = E_g$.

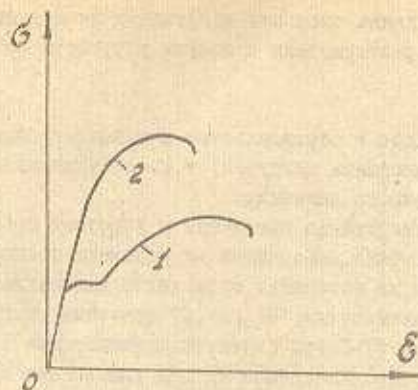


Рис. 17. Диаграммы растяжения пластичной стали:
 1 - статическое нагружение,
 2 - очень быстрое нагружение

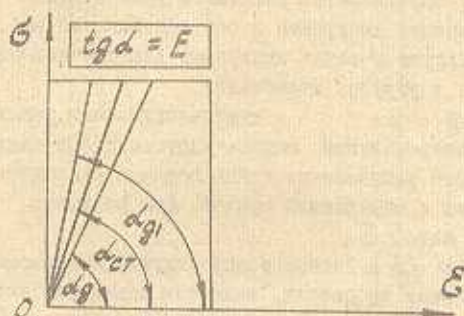


Рис. 18.

Изменение модулей упругости в зависимости от вида и скорости нагружения:

$E_{ст} = tg \alpha_{ст}$ - статический, или релаксированный;

$E_d = tg \alpha_d$ - динамический при колебательных процессах;

$E_{д1} = tg \alpha_{д1}$ - нерелаксированный, или адиабатический

ЛИТЕРАТУРА

1. Гийон И. Предварительно напряженный железобетон.—М. Госстройиздат, 1959г.
2. Смирнов А.Ф., Сопротивление материалов,—М. Высшая школа, 1975г.
3. Гуревич С.А. Энергетическая интерпретация стадийности роста усталостной трещины, материалы VIII Всесоюзной конференции по усталости металлов.—М., Наука, 1982г.
4. Сборник терминов по классической механике, группа 10, сопротивление материалов, отдел технической терминологии,—Варшава, 1965г.
5. Такео Ёсубори. Научные основы прочности и разрушения материалов. — Киев, Наукова думка, 1978г.
6. Кристал М.А., Эпштейн Л.Е. Механические и физические особенности разрушения металлов,—МехТОМ, 1978г. №4.
7. Кристал М.А., Эпштейн Л.Е. Физические особенности зарождения и роста трещин — МехТОМ, 1980г. № 1.
8. Работнов Ю.И. Сопротивление материалов — М., Госиздат физико-математической литературы, 1962г.
9. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов, в 2-х т.—М., Наука, 1965г.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

1. Однородный материал – материал, свойства которого одинаковые в каждой его точке.
2. Изотропный материал – материал, свойства которого одинаковые и не зависят от направления испытания.
3. Анизотропный материал – материал, свойства которого зависят от направления испытания.
4. Напряжение – внутренняя сила, приходящаяся на единицу площади.
5. Прочность – способность тела сопротивляться разрушающему воздействию внешних сил.
6. Деформация – временное или постоянное изменение формы или размеров тела под действием внешних сил.
7. Упругость – способность материала полностью восстанавливать свою форму и размеры после удаления внешних сил, вызвавших деформацию.
8. Пластичность – свойство материала необратимо деформироваться без нарушения сплошности под действием внешних сил.
9. Хрупкость – свойство материала разрушаться под действием внешних сил, разделяясь на части без заметной пластической деформации.
10. Разрушение пластическое (вязкое). Разрушение, которому предшествует большая пластическая (остаточная) деформация. Вязкий излом имеет чашевидное микростроение.
11. Разрушение хрупкое. Разрушение в результате внезапного разделения напряженного тела на части без какой-либо подпадающей измерения неупругой деформации. Хрупкий излом имеет лучистое микростроение.
12. Твердость тела – его способность сопротивляться внедрению в него другого более прочного тела (внедрителя).
13. Предел упругости (технический) – наибольшее напряжение, при котором в материале не обнаруживаются макроскопические остаточные деформации. Следует отметить, что величина этой механической характеристики прочности зависит от точности испытательной машины.
14. Предел текучести (технический) – напряжение, при котором происходит быстрый рост пластической деформации без увеличения нагрузки. Следует отметить, что величина этой механической

характеристики прочности зависит от точности испытательной машины.

15. Физический предел упругости – соответствует первому сдвигу по кристаллографической плоскости в отдельном зерне благоприятно ориентированном по отношению к линии действия силы (под углом $\sim 45^\circ$).
16. Физический предел текучести – соответствует нескольким (многим) сдвигам по кристаллографическим плоскостям, происходящим практически одновременно в зернах, ориентированных по отношению к линии действия силы под углом $\sim 45^\circ$.
17. Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – напряжение, при котором остаточная деформация достигает условной величины, равной 0,2% первоначальной длины образца.
18. Деструкция материала – микроразрушения, связанные с нарушением межатомных связей и приводящие к появлению микротрещин.
19. Квант разрушения – длина минимально возможного "шага" трещины, зависящая от свойств материала и условий разрушения.
20. Наилеп (упрочнение) – изменение свойств и структуры упруго-пластичного материала, в результате предварительного нагружения выше предела текучести.
21. Эффект Баушингера – уменьшение пределов пропорциональности и текучести при растяжении, после предшествующего нагружения сжатием и наоборот.
22. Петля гистерезиса – несовпадение кривой нагружения с кривой разгрузки в результате необратимых потерь энергии деформации.

3. КОНТРОЛЬ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

3.1. Вопросы для подготовки к лабораторным работам

3.1.1. Испитание малоуглеродистой стали на растяжение

1. Как вычислить нормальные напряжения в поперечном сечении дек-трально растянутого стержня и каков закон их распределения?
2. Сформулируйте закон Гука при растяжении и сжатии.
3. Какие деформации называются упругими, какие остаточными?
4. Цель работы при испытании образцов на растяжение, порядок ее выполнения. Принципиальная схема работы испытательной машины.
5. Виды образцов при испытании на растяжение. Что такое рабочая и расчетная длина образца? Какая существует связь между расчетной длиной и диаметром нормального, укороченного и плоского образца?
6. В каких координатах строятся рабочая (индикаторная) и условная диаграммы растяжений и какая между ними разница?
7. Покажите на условной диаграмме растяжения:
 - а) пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности, дайте их формулировки и как они определяются. Какие это характеристики материала?
 - б) напряжение, соответствующее разрушению при разрыве. Как вычислить истинное напряжение при разрыве?
 - в) площадку текучести и напряжение, при котором в образце появляется шейка. Какие при этом растут деформации?
 - г) модуль упругости первого рода (киги), охарактеризуйте его и назовите в каких единицах он измеряется;
 - д) наибольшую относительную упругую, остаточную и полную де-формации к моменту разрыва образца;
 - е) область упругих деформаций, область текучести материала, область упрочнения и область снижения сопротивляемости образца;
 - ж) разгрузку после нагружения образца выше предела текучести. Как найти при этом упругую и остаточную составляющие де-формации?

8. Как определить относительное остаточное удлинение и сужение образца после разрыва? Какие это характеристики материала?
9. Каковы особенности разрушения пластичных материалов при испытании на растяжение и от чего они зависят?
10. Как по данным испытаний определить допускаемое напряжение пластичных материалов, если известен коэффициент запаса?
11. Какие характеристики по ГОСТу обозначаются $б_{0,05}$ и $б_{0,2}$, для каких сталей и как они определяются?

3.1.2. Испытание различных материалов на сжатие

- I. Как вычислить нормальные напряжения в поперечном сечении центрально сжатого стержня и каков закон их распределения?
2. Цель испытания образцов на сжатие.
3. Какие материалы называются изотропными и анизотропными?
4. Какие материалы называются хрупкими и пластичными?
5. Какую форму и размеры имеют образцы из стали, чугуна, бетона и дерева до испытания на сжатие? Какой их вид и характер разрушения после испытания и от чего он зависит?
6. Какой вид имеет диаграмма сжатия пластичных материалов, например, стали?
7. Какой вид имеют диаграммы сжатия хрупких материалов: чугуна, бетона и камня?
8. Сравните диаграммы растяжения с диаграммами сжатия чугуна и стали.
9. Каковы особенности испытаний на сжатие анизотропных материалов?
10. Каково различие в диаграммах сжатия дерева при испытании вдоль и поперек волокон?
11. Основные типы машин для проведения испытаний на сжатие и их принцип работы.
12. Как по данным испытания на сжатие и растяжение определить допустимые напряжения для хрупких материалов, если известен коэффициент запаса? Сравните с пластичным материалом?
13. Что такое коэффициент Пуассона и в каких пределах он изменяется для изотропных материалов?

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Беллев Н.М. Сопротивление материалов. М., 1976 и предыдущие издания, гл.2 §6-9, гл.3 §10-17
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. - М., 1974 и предыдущие издания гл.1 §8-9, 12-19.
3. Сопротивление материалов Писаренко Г.С., Киев, 1974 и предыдущие издания, гл.4 §28-31, 33-34
4. Справочник по сопротивлению материалов. Писаренко Г.С. и др. - Киев: 1975, гл.4 §25-26, 28
5. Смирнов А.Ф. и др. Сопротивление материалов.-М., 1975 (и предыдущие издания), гл.2 §7, 10-18, §20
6. Никифоров С.Н. Сопротивление материалов.-М., 1960 (и последующие издания), гл. I §4,5, гл.2 §1-3, 6, 8, гл.II §6,7,8.
7. Дарков А.В. и др. Сопротивление материалов.-М., 1965, гл.1 § 3,4,6 гл.2 §1-4,8 (рекомендуется для студентов вечернего факультета).
8. Беллев Н.М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов.- М. 1956 (и последующие издания), введение, §1, гл.1 §3,4,6,11, 18,33,34.
9. Афанасьев А.Н. и др. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов.-М., 1975, гл.1 §1,3,5, (2,5).

3.2. Дополнительные вопросы к защите цикла лабораторных работ по теме: "Экспериментальные исследования физико-механических характеристик различных материалов при испытании на растяжение и сжатие"

1. Покажите схематизированные диаграммы $\sigma = f(\varepsilon)$ для идеально упругого, идеально упруго-пластичного и упруго-пластичного упрочняющегося материала.
2. Сравните диаграммы растяжения различных сталей - малоуглеродистой, малоуглеродистой подвергнутой наклепу, легированной и термически обработанной (закаленной и низкоотпущенной). Какая характеристика прочности является основой для каждой из этих диаграмм?
3. Что такое прочность, упругость, пластичность, хрупкость и твердость материала?
4. Что называется эффектом Баушингера?
5. Что называется петлей гистерезиса?
6. Как записываются условия прочности и как определяются допускаемые напряжения при расчете на прочность пластичных и хрупких материалов?
7. Как влияет скорость нагружения на механические характеристики материала? Покажите на диаграмме растяжения модули упругости-статический, при ударе и при колебаниях.
8. Какова физическая природа предела текучести, предела прочности и наклепа?
9. Какая разница между физическим и техническим пределом упругости?
10. Каков механизм процесса разрушения чугуна и бетона?
11. Что называется пластическим (вязким) и хрупким разрушением? Каковы особенности перемещения трещин и каков микроскопический характер разрушения в местах излома?
12. Как влияют повторные сжимающие нагрузки на диаграмму сжатия бетона?
13. Дислокационный механизм пластической деформации

Примечание:

1. При подготовке к защите цикла лабораторных работ необходимо учесть вопросы и рекомендуемую литературу, представленные на слайдах 32, 33, 34.
2. Вопросы 8, 9, 10, 11, 12, 13 даны для специальности ИГС.

3.3. Методика применения тестовых карточек при защите цикла лабораторных работ

Разработанные контрольно-обучающие тестовые карточки, образец которой представлен на рис.19, применяются при проверке знаний студентов, полученных при выполнении цикла лабораторных работ по растяжению и сжатию.

Тестовые карточки содержат необходимые диаграммы, схемы, рисунки, отличаются лаконичностью вопросов и ответов, не содержат неправильных формулировок. Правильный ответ выбирается из возможных вариантов ответа, а наглядность и иллюстративность тестов является их дополнительным обучающим средством. Многие вопросы карточек носят обобщающий характер по результатам проведенных экспериментов с привлечением теоретического, а также дополнительного материала по современному представлению о процессах деформирования и разрушения конструкционных материалов.

Тестовой билет состоит из пяти вопросов (рис.19), из которых две пары вопросов а) и б) тематически связаны друг с другом. Ответы на первые вопросы каждой пары даются путем выбора правильного варианта из представленных в карточке. Ответы на вторые вопросы каждой пары студент должен сформулировать сам в устной или письменной форме. В ответе на последний вопрос (пятый) студент должен проявить углубленные знания.

Знания студентов оцениваются по пятибалльной системе следующим образом. Правильный ответ на все пять вопросов оценивается отличной оценкой, на четыре первых вопроса - хорошей и на любые три вопроса - удовлетворительной. Все остальные ответы считаются, как правило, неудовлетворительными. На подготовку студенту отводится 10 минут. Время, затраченное преподавателем на подгруппу (15 человек), составляет 10...15 минут.

Подготовку к защите цикла лабораторных работ студенты должны проводить во внеаудиторное время. На стенде кафедры представлены обобщающие вопросы (приложения 2 и 3). Изучив по ним материал, студенты могут отвечать на вопросы, из которых составляются тестовые карточки. Такой подход способствует развитию навыков студентов в самостоятельной работе.

Разработанная методика позволяет преподавателю быстро и

БИЛЕТ № 16

ВОПРОС		ОТВЕТ	
	Сравните диаграммы растяжения. К какой стали относится диаграмма Б?	1	Малоуглеродистой
		2	Среднеуглеродистой
		3	Закаленной и низкоуглеродистой
Какими отрезками определяются упругая, остаточная и полная деформации и моменту разрыва образца на диаграмме Б?			
2 Какой зависимостью определяется коэффициент Пуассона?	1	$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$	
	2	$G = \frac{\tau}{\gamma}$	
	3	$\mu = \left \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right $	
Что называется коэффициентом Пуассона, его физический смысл, пределы его изменения для изотропных материалов?			
3	Как влияют повторные сжимающие нагрузки на диаграмму сжатия бетона?		

Рис.19. Образец тестовой карточки

более объективно проконтролировать знания студентов без потери контактов с ними, проследить процесс их мышления, вовремя поправить и обогатить их знания.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

I. Краткие теоретические сведения.	3
I.1. Понятие о механизме процессов упругой и пластической деформации при растяжении пластичных материалов	3
I.2. Пластическое и хрупкое разрушение	13
I.3. Влияние химического состава и способа обработки стали на вид диаграммы растяжения	17
I.4. Понятие о механизме процессов разрушения хрупких материалов	21
I.5. Поведение пластичных и хрупких материалов при повторном нагружении	23
I.6. Влияние скорости нагружения на механические характеристики и модули упругости материала	27
Литература.	29
2. Основные термины и понятия	30
3. Контроль самостоятельной работы студентов	32
3.1. Вопросы для подготовки к лабораторным работам	32
3.1.1. Испытание малоуглеродистой стали на растяжение	32
3.1.2. Испытание различных материалов на сжатие	33
3.2. Дополнительные вопросы к защите цикла лабораторных работ по теме: Экспериментальные исследования физико-механических характеристик различных материалов при испытании на растяжение и сжатие	35
3.3. Методика применения тестовых карточек при защите цикла лабораторных работ	36

Особенности механизмов процессов деформирования,
упрочнения и разрушения различных материалов

Методические указания к изучению раздела "Экспериментальные
исследования физико-механических характеристик различных матери-
алов" курса "Сопоставление материалов"

Людмила Евгеньевна Эпштейн

Редактор Авадшвина Н.В.
Корректор Фомичева Н.А.

Политехнический институт. Тольятти, Белорусская, 14.

Подписано в печать 14.12.84. Формат 60x84 1/16
Бумага оберточная белая. Обратная печать. Усл. п. л. 2,5
Тираж 300 экз. Заказ № 2217

Областная типография им. Матя, г. Куйбышев, ул. Вещюка, 60