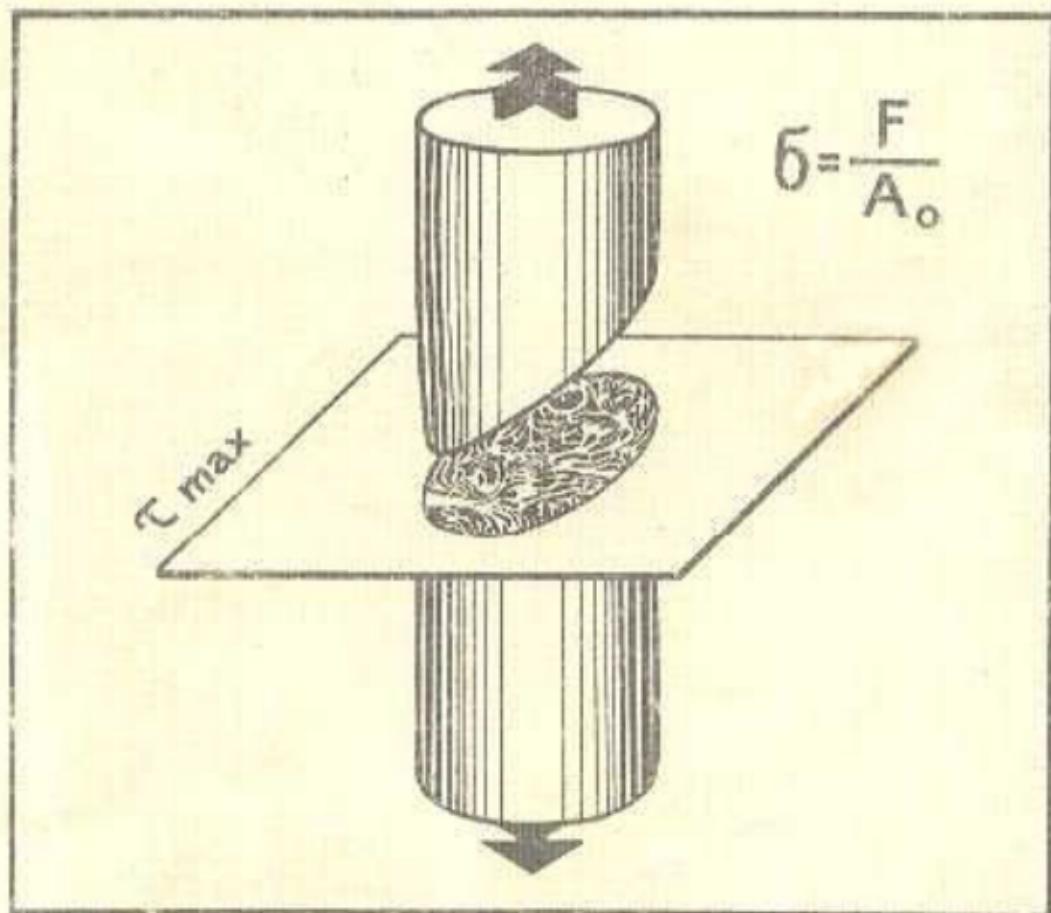


Л.Е. ЭПШТЕЙН

# ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

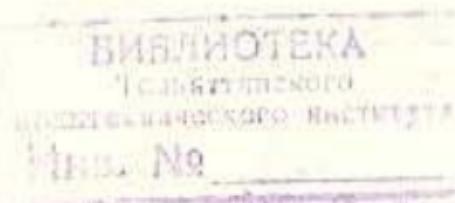


МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Л. Е. Эпштейн

ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКИХ  
ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие



ТОЛЬЯТТИ 1988

Эштейн Л.Э. Основы механических испытаний материалов.  
Учебно-пособие.-Куйбышев:КуАИ,1988.- 93 с.

Рассмотрены механизмы деформирования, упрочнения, разрушения; влияние различных факторов на физико-механические характеристики материалов; конструкционная прочность; критерий вязкости разрушения  $K_{Ic}$  и использование акустической эмиссии для его определения; прочность композитов на основе свойств их составляющих.

Изложена методика проведения лабораторных работ по курсу "Сопротивление материалов" с применением обобщающих схем по теории изучаемого раздела, приведены образцы контрольно-обучающих карточек, бланки журнала лабораторных работ и основные термины и понятия.

Пособие предназначено для студентов, изучающих курс "Сопротивление материалов" и спецкурсы, а также может быть использовано в инженерной практике.

Рецензенты:

управление лабораторно-исследовательских работ Волжского автомобильного завода (начальник управления к.т.н.А.К.Тихонов);  
д.т.н. проф. Ю.К.Фанстов (зав.кафедрой материаловедения  
КуАИ).

Научный редактор д.т.н. проф. М.Л.Криштал.

Утверждено редакционно-издательской секцией методического совета института.

© Тольяттинский политехнический  
институт, 1988

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для изучения студентами раздела курса сопротивления материалов "Экспериментальные исследования физико-механических характеристик различных материалов" и методики выполнения соответствующих лабораторных работ.

В пособии содержатся данные по структуре материалов, оказывающей существенное влияние на механизм процессов деформирования и разрушения. Особое внимание на основе современных научных данных уделено вопросам разрушения конструкций, конструкционной прочности, исследованию вязкости разрушения, в частности критерия  $K_{Ic}$ , а также новому методу изучения роста трещин и пластической деформации – акустической эмиссии.

Показаны методика проведения лабораторных работ и контроль знаний студентов: циклы лабораторных работ, обобщающие схемы, контрольные карточки и т.д. Под циклом понимается несколько лабораторных работ, объединенных одной темой. Каждый цикл может быть дополнен другими работами (например, сдвиг – испытанием древесины и чугуна; кручение – определением модуля сдвига), но название и идеальная направленность цикла при этом не изменяются. Защита цикла лабораторных работ предусматривает также усвоение теоретического материала по данной теме, знание которого трудно проконтролировать в течение семестра.

Каждая лабораторная работа или цикл имеют теоретическую часть, представленную в виде обобщающих схем. Разработанные схемы, естественно, не могут заменить лекции или учебники, они являются средством для обобщения пройденного материала, быстрого его запоминания и длительного хранения полученной информации.

Предлагаемые карточки для контроля подготовленности студентов к лабораторной работе и к отчету по циклу выполняют контрольно-обучающие функции и позволяют проводить ускоренный опрос, оценивая

знания студентов более объективно при формально простом подходе.

В пособии содержатся необходимые сведения о последних научных достижениях в области физики прочности и некоторые результаты научных исследований, проведенных в ТолПИ.

Использован опыт работы преподавателей кафедры "Сопротивление материалов" ТолПИ со студентами по выполнению лабораторных работ. Автор благодарит сотрудников кафедры за помощь в освоении изложенной методики и в особенности доцента Т.Г.Карачаеву за разработанные ею схемы З.1 и З.4.

## I. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ, УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Для обеспечения прочности и надежности элементов конструкций необходимо знать физико-механические характеристики материалов. Конструкционными материалами являются металлы, стали, сплавы, бетон, кирпич, дерево и др., а также композиционные материалы.

В настоящее время, когда конструкции работают в сложных условиях циклических и динамических нагрузений, при высоких и, наоборот, очень низких температурах, в агрессивных атмосферах и в потоке радиации, законы классической науки о сопротивлении материалов недостаточны для их расчетов. Поэтому инженерные модели конструкционных материалов необходимо дополнить физическими и инженерно-физическими моделями.

Физические модели созданы физикой твердого тела. Они основаны на кристаллическом строении металлов и сплавов и учитывают различные дефекты кристаллической решетки, существенно влияющие на прочность материалов. Исследования направлены на повышение прочности и пластичности металлов и сплавов.

Инженерно-физические модели материала построены в материаловедении. В них материал представлен как совокупность зерен с различно ориентированной кристаллической структурой. Основное назначение этих моделей – разработка научных основ статистического описания механических свойств материала.

Эти два вида моделей отличаются от инженерных моделей классического сопротивления материалов, рассматривающих материал как сплошное, однородное деформируемое тело. Инженерные модели применяются в задачах на прочность и разрушение материала в сочетании

с результатами экспериментальных исследований его механических характеристик, которые определяются при помощи испытательных машин на специально изготовленных образцах, подвергнутых различным видам нагружений в соответствии с ГОСТами.

Для творческого осмысливания механизмов протекания упругих и пластических деформаций необходимо знать процессы, происходящие под действием внешних сил, а также влияние особенности структуры и способов нагружения испытуемых образцов и деталей на упругость и пластичность. Изучаются эти вопросы на основе принятых физических и инженерно-физических моделей, так как явления, развивающиеся при деформации и разрушении материалов, определяются их структурой, т.е. дискретным строением вещества, и не могут быть объяснены средствами механики сплошной среды.

### 1.1. ПОНЯТИЕ О МЕХАНИЗМЕ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В инженерной практике основные механические характеристики материалов получаются при испытании на растяжение с разрывом. Прочностные характеристики определяются следующими величинами: пределами пропорциональности  $\sigma_{pu}$ , упругости  $\sigma_u$ , текучести  $\sigma_t$ , прочности  $\sigma_b^*$ . Характеристики пластичности определяются относительным остаточным удлинением  $\delta$  и относительным остаточным сужением  $\psi$  после разрыва.

Рассмотрим поведение металлов при растяжении и механизмы их упругих и пластических деформаций. В качестве примера проанализируем различные стадии нагружения малоуглеродистой стали, диаграмма растяжения которой приведена на схеме 3.1. Напряжения до предела пропорциональности на диаграмме растяжения выражаются 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 показывает, что первые пластические сдвиги наблюдаются значительно раньше технического предела упругости.

\* В дальнейшем будем называть эти величины техническими пределами напряжений.

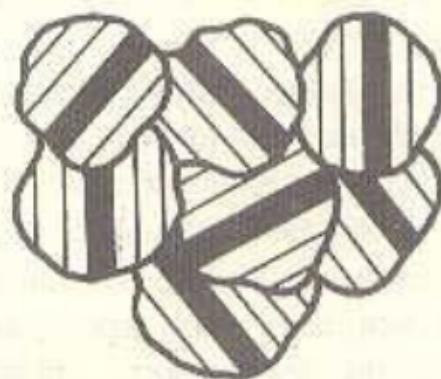


Рис. I.1. Кристаллографическая ориентировка плоскостей отдельных зерен (идентичные плоскости отдельных зерен указаны штриховкой)

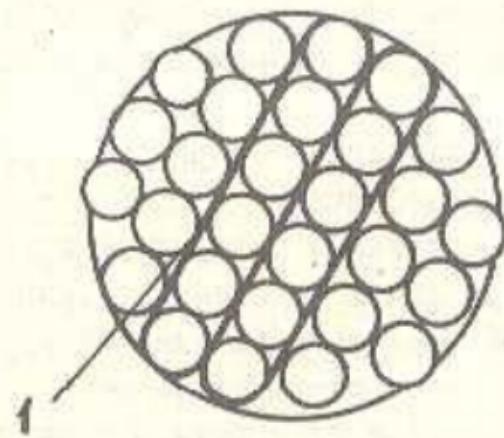


Рис. I.2. Упаковка атомов по кристаллографическим плоскостям отдельного кристалла (зерна):  
I – ориентировка плоскостей скольжения, показанных штриховкой на рис. I.1

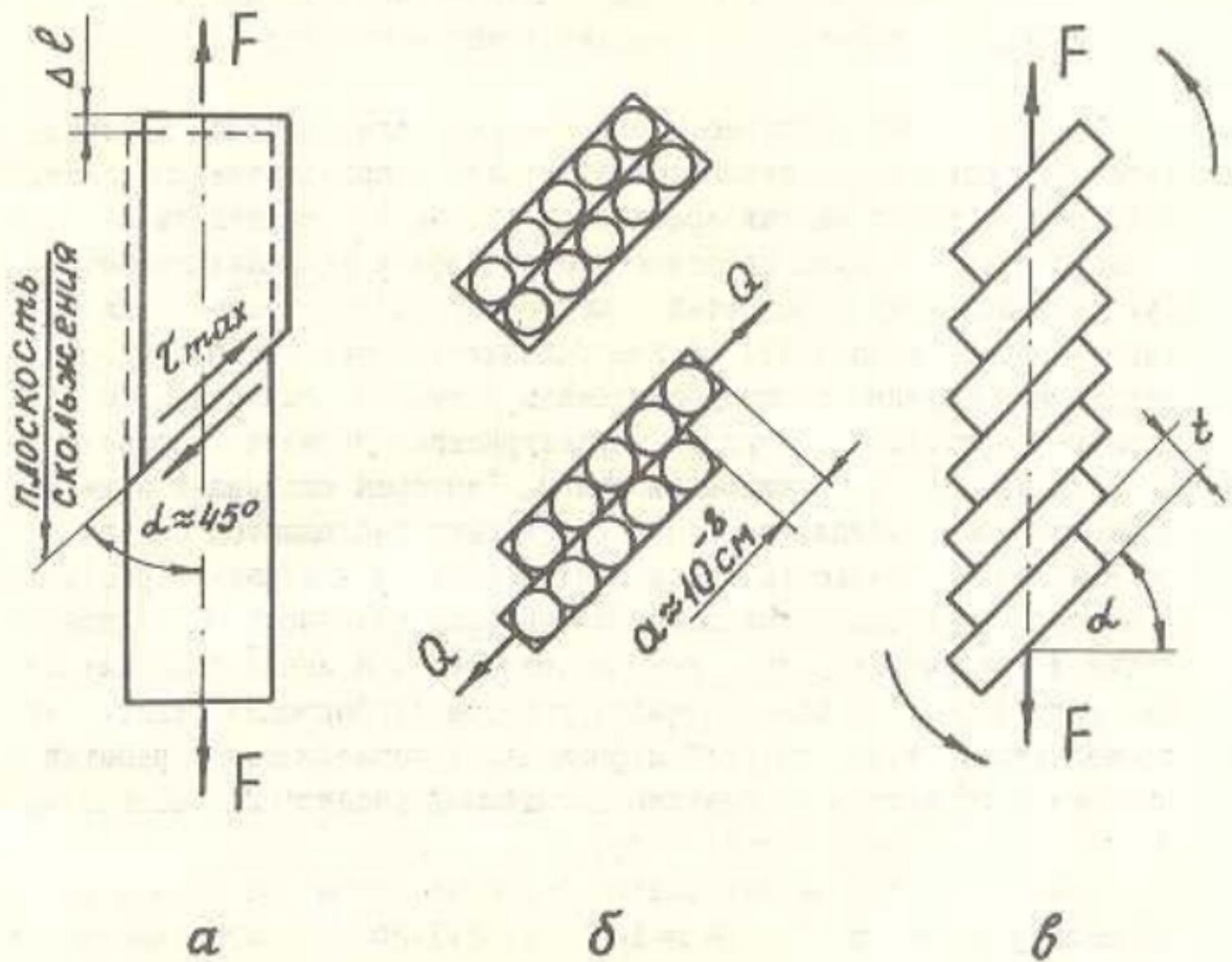


Рис.1.3. Механизм деформирования монокристалла:  
а - первый сдвиг по плоскостям скольжения;  
б - атомистическая схема сдвига; в - образование пачек скольжения и их поворот

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

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. I.1). В кристаллической решетке благодаря межатомным связям атомы расположены в строго определенном порядке (рис. I.2). Упругие характеристики металла определяются величиной силы межатомной связи, которая оказывает влияние и на прочность металлов. При растяжении наблюдаются сдвиги по кристаллографическим плоскостям в отдельных зернах (рис. I.3а) и поворот образовавшихся пачек скольжения толщиной  $t$ , приводящий к увеличению угла  $\alpha$  по отношению к линии действия силы (рис. I.3в). В области чисто упругой деформации сдвиги не проявляются, т.е. упругая деформация кристаллической решетки связана с обратимым изменением межатомных расстояний, полностью устраниющимся после снятия нагрузки.

Известно, что каждый сдвиг осуществляется на одно межатомное расстояние  $\alpha \approx 10^{-8}$  (рис. I.3б). Испытательная машина высокой точности по удлинению позволяет фиксировать  $\sim 10^{-3}$  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 испытательных машин  $\approx 10^{-2}$  см (имеющихся во многих лабораториях кафедр сопротивления материалов) число сдвигов  $\approx 10^6$ , что достаточно мало в сравнении с радиусами, реализующимися при лавинной деформации, соответствующей пределу текучести  $\sigma_t$ , и не оказывается заметным образом на общей линейной зависимости между напряжением и деформацией на диаграммах растяжения.

Фактически первые пластические деформации, как уже было отмечено, начинаются существенно раньше, поэтому, кроме технического предела упругости  $\sigma_u$ , различают еще и так

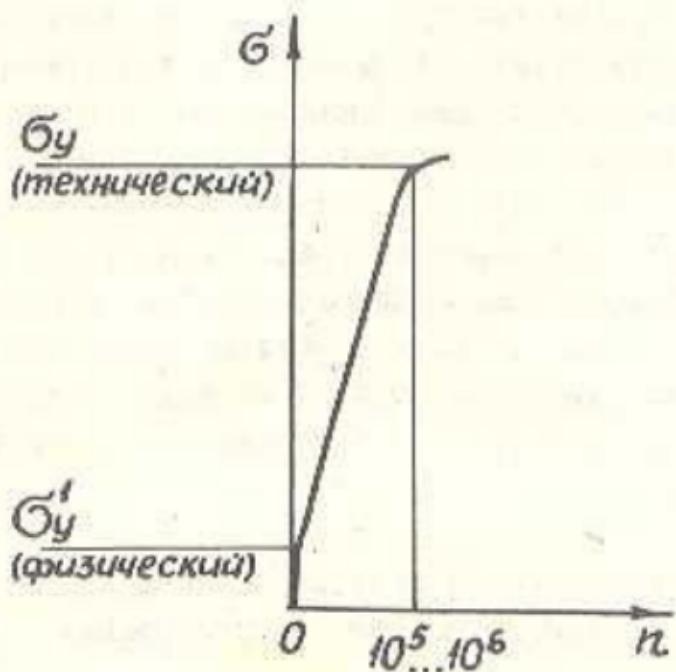


Рис. I.4. Технический и физический пределы упругости;  $n$  - число сдвигов

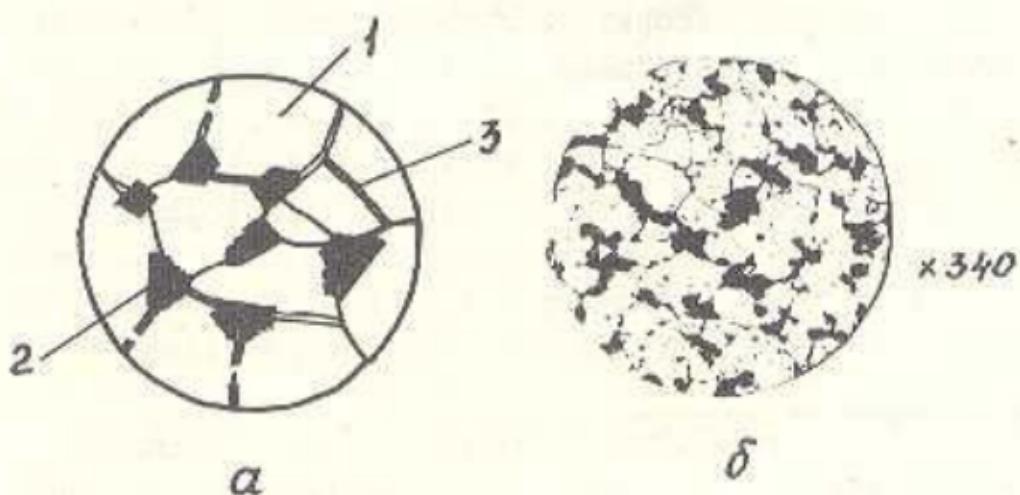


Рис. I.5. Микроструктура малоуглеродистой стали Ст3:  
а - схема (1 - феррит, 2 - ледит и 3 - сетка цементита); б - микроснимок

называемый физический предел упругости  $G_y^{**}$ , соответствующий первым сдвигам (рис. I.4). Например: физические пределы упругости и текучести для малоуглеродистой стали СтЗ соответствуют первому сдвигу и составляют  $\sim 6,0$  МПа, а технический предел упругости в соответствии с показаниями испытательной машины  $\sim 180$  МПа, т.е. в 30 раз больше. Сдвиги приводят к упрочнению, так называемому наклепу металла, поэтому технические пределы упругости и текучести оказываются намного больше физических. Чем точнее испытательная машина, тем короче на диаграмме растяжения получается прямолинейный участок упругой области, соответствующий закону Гука. Именно поэтому пределы упругости  $G_y$  и пропорциональности  $\sigma_{pro}$  трудно поддаются определению, так как они меняют свою величину, и в справочные данные по свойствам материалов обычно не включаются.

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

Практически при растяжении, т.е. линейном напряженном состоянии, первые сдвиги происходят в зернах, оказавшихся ориентированными кристаллографическими плоскостями сдвига под углом, близким к углу  $45^\circ$  по отношению к линии действия силы  $F$ , так как под этим углом действуют наибольшие касательные напряжения  $T_{max}$ . Сдвиговые деформации сопровождаются образованием дачек скольжения и их поворотами, т.е. деформация металла (удлинение образца с одновременным сужением) связана с изменением ориентации отдельных зерен до отношения к линии действия силы. По мере увеличения силы и развития сдвиговых деформаций (рис. I.3) ориентация плоскостей скольжения различных зерен стремится измениться, постепенно приближаясь к углу  $45^\circ$  по отношению к линии действия этой силы. Предел текучести на диаграмме растяжения

<sup>\*\*</sup> Напряжение, соответствующее первым сдвигам, называют физическим пределом упругости. В сопротивлении материалов указанная величина не рассматривается, и технические пределы упругости  $G_y$  и текучести  $\sigma_T$  также иногда называют физическими.

Проявляется тогда, когда в большинстве зерен, ориентированных благоприятной плоскостью скольжения под углом, близким к  $45^\circ$  к линии действия силы, одновременно проявляются пластические сдвиги. При этом деформация, т.е. течения материалов, происходит практически без возрастания нагрузки, а иногда при некотором ее снижении. Следы сдвигов можно наблюдать невооруженным глазом на поверхности плоского образца в виде полос, называемых линиями Людерса-Чернова.

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

В сплавах 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 деформации\*. На рис. I.6 показана краевая дислокация с закрепляющими атомами (позиция  $\alpha$ ) и последовательные этапы этого процесса. По мере возрастания напряжения от нуля до  $\sigma_3$  (позиции б, в и г) упругие деформации постепенно увеличиваются, последовательно достигая значений  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ . Этую зависимость схематически можно представить на диаграмме растяжения  $\sigma = f(\varepsilon)$  (рис. I.7). Начиная от  $\sigma_3$  и далее происходит отрыв дислокации (позиции д, е), что соответствует появлению пластических (необратимых) деформаций  $\varepsilon_4$  и  $\varepsilon_5$ , т.е. площадки текучести на диаграмме растяжения и пределу текучести  $\sigma_t$ . Дальнейшее перемещение краевой дислокации и выход ее на

\*Дислокация – линейный дефект кристаллической решетки. Отличается высокой подвижностью в поле напряжения по кристаллографическим плоскостям решетки. Пластическая деформация металлов осуществляется главным образом в результате движения дислокаций.

ж

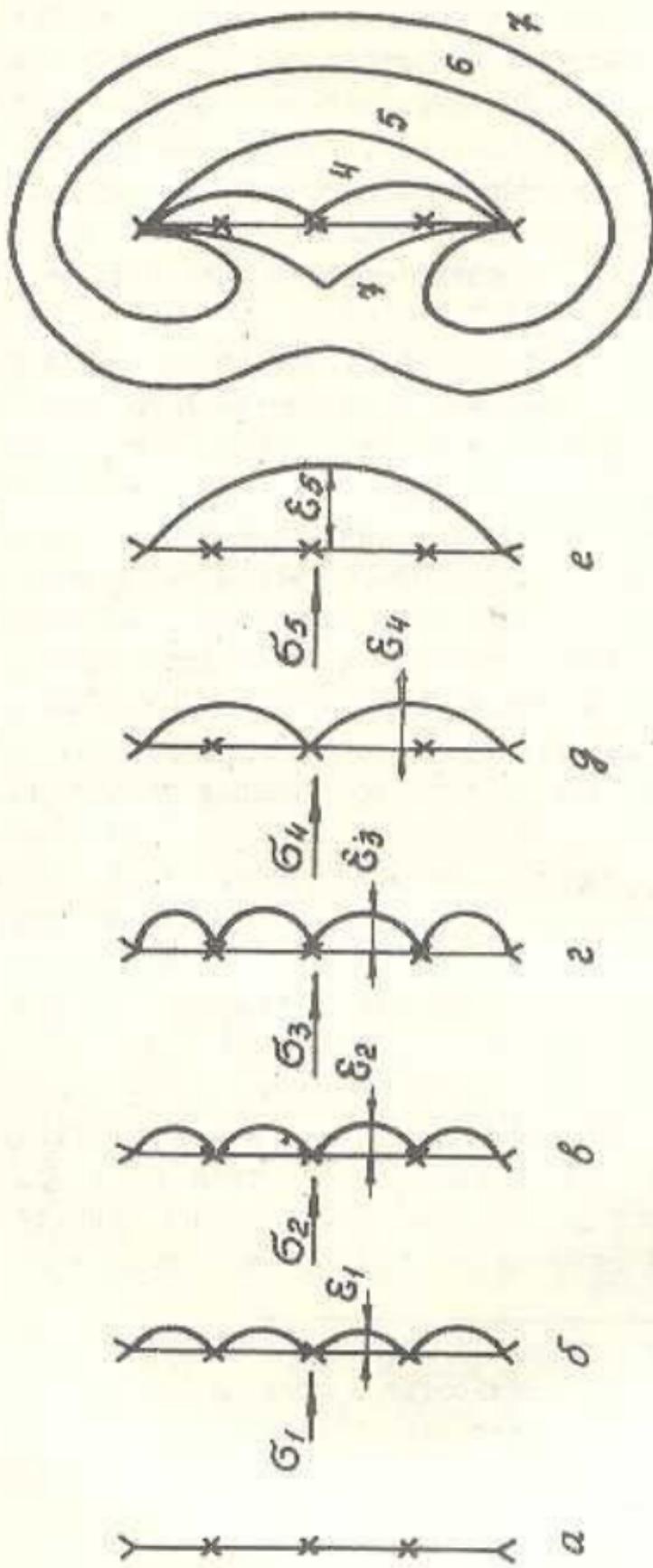


Рис. I.6. Порядковательные этапы деформирования и отрыва отрезка краевой дислокации: а - краевая дислокация до нагрузления (х - закрепляющие атомы); б, в, г - другое нагружение; д, е - пластическое нагружение в результате отрыва отрезка краевой дислокации; ж - этапы отрыва петель дислокаций от отрезков к концу площадки концентрации

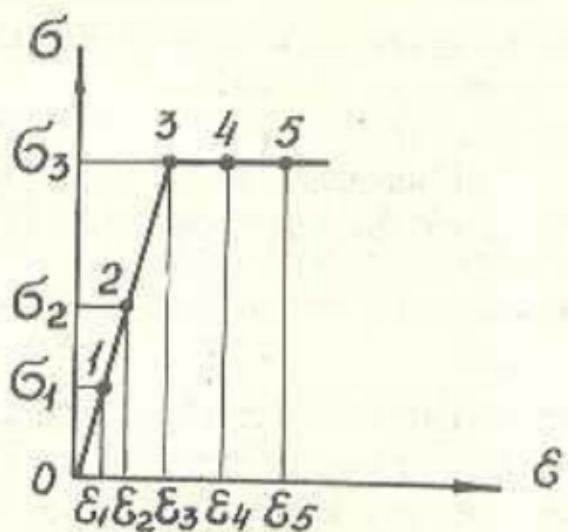


Рис. I.7. Схематизированная диаграмма растяжения, соответствующая различным этапам смещения краевой дислокации.

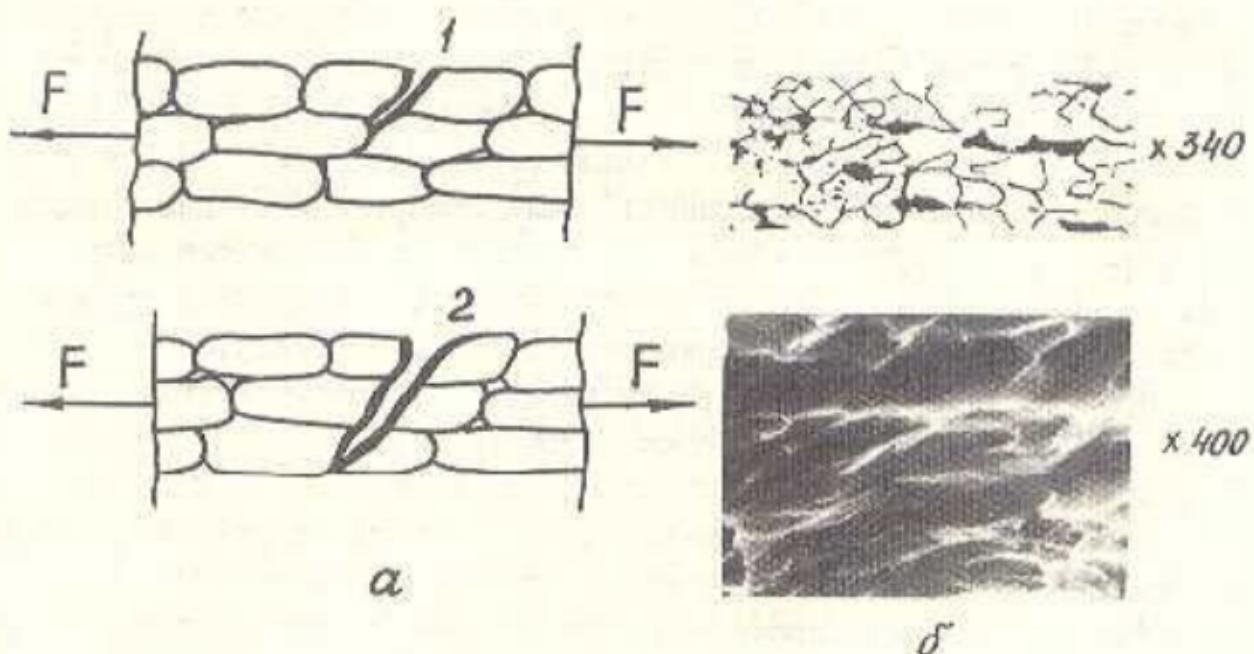


Рис. I.8. Разрушение материала (металла) в зоне шейки:  
а - схема роста трещины (1- начальный и 2 - конечный этапы); б - вытянутые зерна под микроскопом стали Ст3

поверхность (позиция ж) приводит к образованию ступеньки сдвига в кристаллической решетке (рис. I.3б).

По достижении предела текучести и при дальнейшем увеличении нагрузки напряжения вновь начинают расти до своего наибольшего значения, соответствующего пределу прочности  $\sigma_B$ .

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, т.е. близких к углу  $45^\circ$  к линии действия силы, зернах. 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. Переориентация таких зерен вызывает деформации соседних с ними менее благоприятно ориентированных зерен, что делает их ориентацию более благоприятной для развития пластической деформации. Это объясняется возникновением зоны упрочнения, а также наличием упругой деформации наряду с пластической. С ростом нагрузки происходят повторные сдвиговые деформации до исчерпания пластичности и зерна вытягиваются. Начиная от площадки текучести и далее, в наиболее слабых местах возникают микроразрушения — деструкция металла, т.е. нарушается межатомная связь, и появляются микротрешины. В районах концов микротрешин создаются области концентрации напряжений, приводящие к ускоренному разрушению (рис. I.8).

Процесс деструкции материала ведет к его ослаблению и, следовательно, конкурирует с процессом упрочнения материала (особенно в мастих, где еще нет микротрешин), развивающимся за счет наклона. При нагружении после достижения конца площадки текучести правилирует наклеп, и прочность деформируемого материала в целом возрастает вплоть до предела прочности. После предела прочности резко возрастает роль деструкции, что приводит к быстрому разрушению материала.

## I.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. I.9а), для хрупкого, например чугуна, – хрупкое (рис. I.9б).

При вязком разрушении на разорванных частях образца возникают кратер и конус. Угол между осью и образующей конуса составляет  $45^{\circ}$ , 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 почти перпендикулярно оси, где действуют максимальные нормальные напряжения.

Деление материалов на пластичные и хрупкие носит достаточно условный характер, так как в некоторых случаях хрупкие материалы имеют пластические свойства, а пластичные – хрупкие. Например, мягкая сталь при низкой температуре, а также большой скорости нагружения разрушается как хрупкий материал\*. Хрупкий материал, например мрамор, в условиях всестороннего сжатия способен к пластическому течению. Так называемые твердые стали разрушаются без образования шейки с характерным хрупким изломом. 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 объективные данные дают микроскопические исследования 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 в заданных условиях ее развития называется квантом разрушения и зависит от свойств материала и особенностей разрушения. При рассмотрении излома при увеличении в несколько сот, а иногда и тысяч раз можно наблюдать вязкое и хрупкое разрушение.

\* Хрупкое разрушение малоуглеродистой стали часто наступает при температуре  $(-60 \dots -80)^{\circ}\text{C}$ .

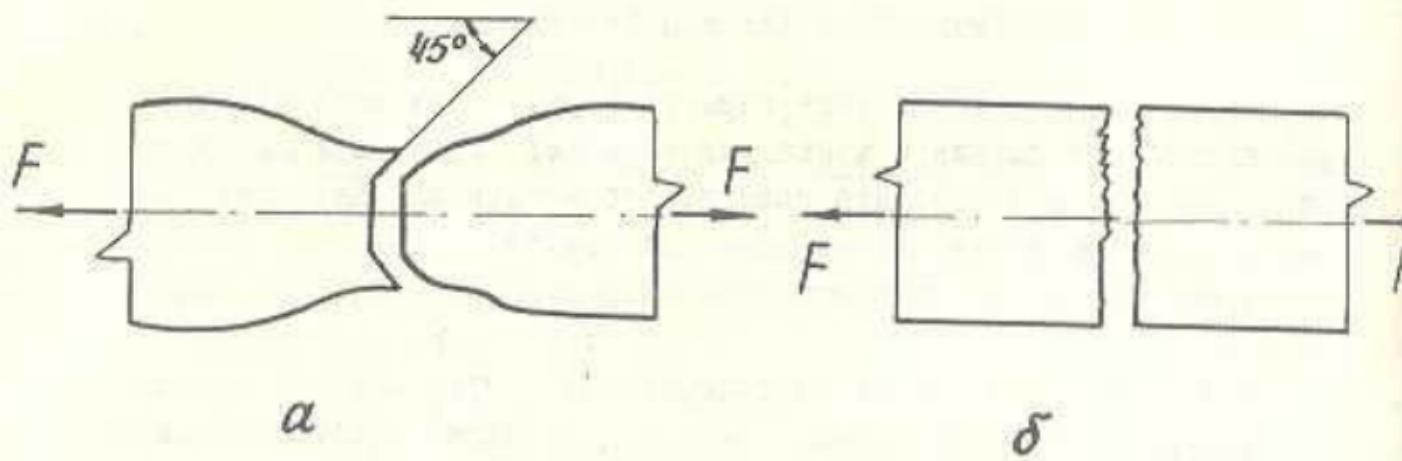
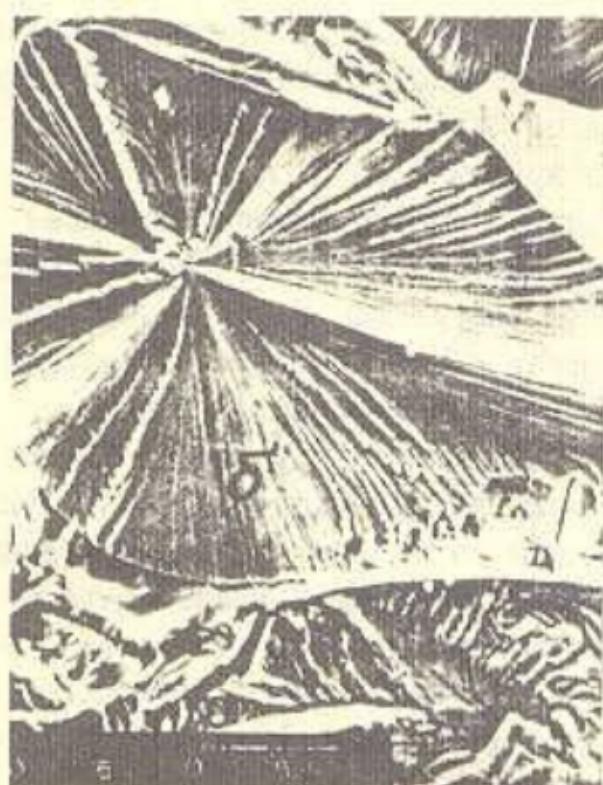


Рис. I.9. Разрушение пластичного и хрупкого материалов:  
а - пластическое разрушение - от сдвига; б - хрупкое  
разрушение - от отрыва



x 3000



x 3000

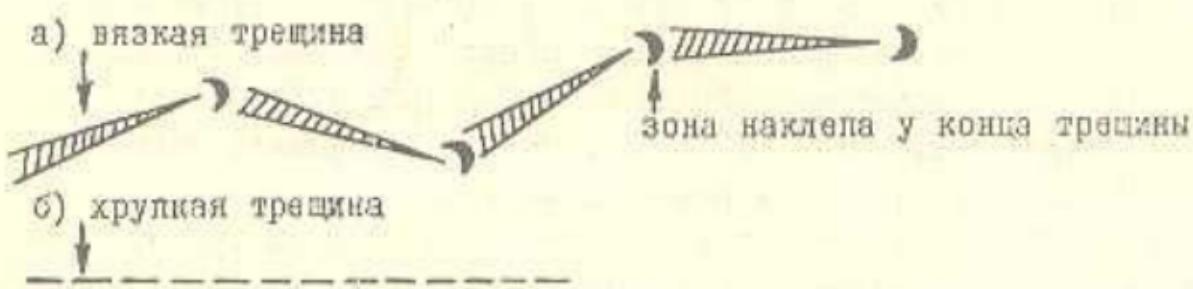
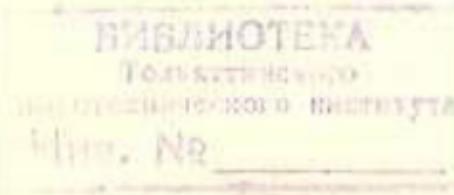


Рис. I.10.

Виды разрушения в местах излома:

а - микроснимок и схема вязкого разрушения (чашевидный излом);

б - микроснимок и схема хрупкого разрушения (лучистый излом).



Вязкое (пластическое) разрушение сопряжено с большой пластической деформацией, предшествующей разрушению и сопровождающей его. При этом трещина перемещается квантами разрушения, соответствующими по порядку 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. Вязкий излом имеет чашевидное микростроение (рис. I.10а).

Хрупкое разрушение происходит без заметных пластических деформаций. Хрупкая трещина почти атомарно острая и перемещается практически без задержек квантами разрушения, соответствующими величине порядка межатомного расстояния. На поверхности разрушения получаются микронадрезы, ориентированные в направлении продвижения начальной зародившейся трещины. Хрупкий излом имеет лущистое микростроение (рис. I.10б).

### I.3. ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СПОСОБА ОБРАБОТКИ СТАЛИ НА ВИД ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ

Для малоуглеродистой стали типа Ст3, алюминия и других цветных металлов характерно наличие ярко выраженной площадки текучести на диаграмме растяжения. Сталь типа Ст3 (рис. I.11, диаграмма I) имеет предел текучести  $\sigma_t \approx 240$  МПа, относительное остаточное удлинение  $\delta \approx 21\ldots 23\%$  и относительное остаточное сужение

$\psi \approx 60\ldots 70\%$ , что типично для мягкой стали. Вид диаграммы растяжения может резко измениться в зависимости от следующих факторов, влияющих на свойства стали:

способа изготовления;

вида ее обработки – накледа, термической и т.п.;

содержания углерода;

содержания легирующих элементов.

Рассмотрим диаграммы растяжения некоторых других сталей и сравним их с диаграммой растяжения стали Ст3.

На диаграмме растяжения 2 (рис. I.11) показана малоуглеродистая сталь Ст3, прошедшая упрочнения вытяжкой в результате накледа. Как видно, пределы пропорциональности  $\sigma_{pu}$  и текучести  $\sigma_t$  повысились, предел прочности  $\sigma_b$  почти не изменился, а пластич-

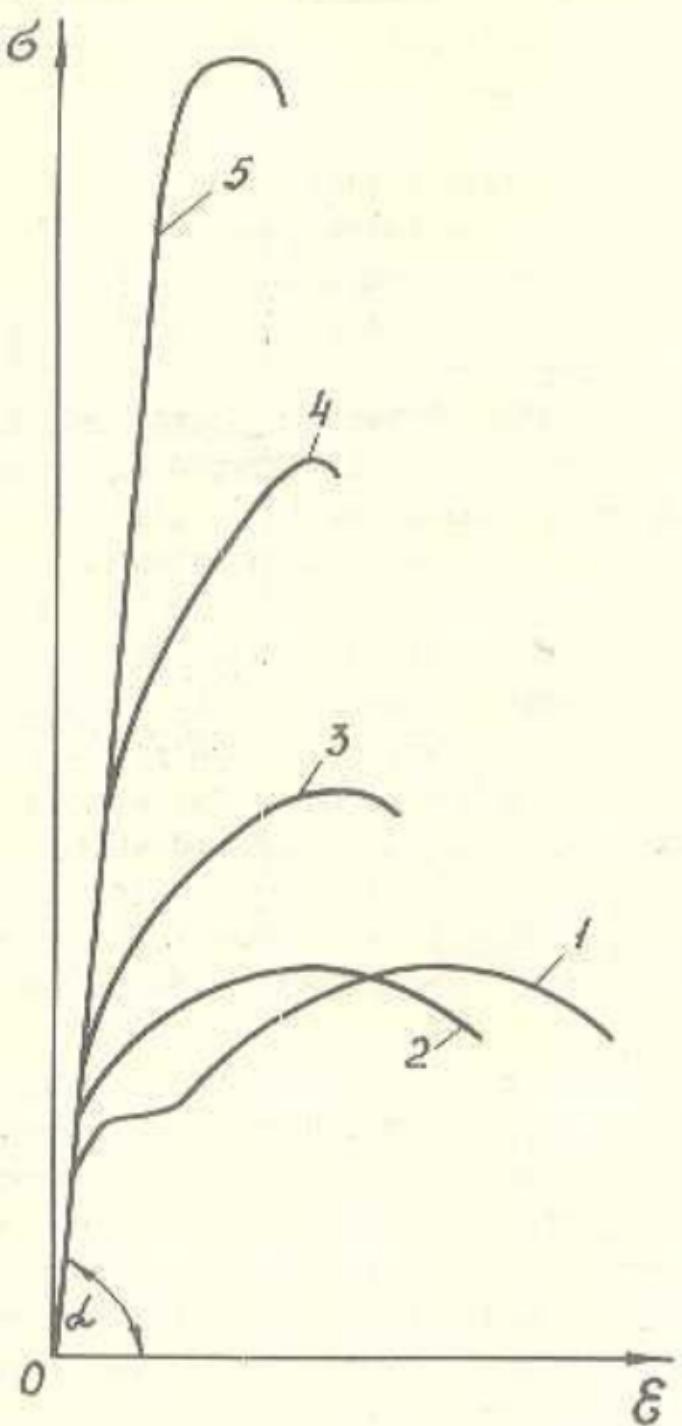


Рис. I.11. Диаграммы растяжения различных сталей:  
 1 - малоуглеродистая; 2 - малоуглеродистая,  
 подвергнутая накледу; 3 - среднеуглеродистая;  
 4 - легированная; 5 - термически обработанная  
 (закаленная и низкоостуженная)

ность стала меньше. При необходимости существенного повышения предела прочности сталь протягивают через фильтры. Возможные варианты вытяжки при волочении и прессовании показаны на рис. I.12а и б.

В углеродистых стаях увеличение концентрации углерода приводит к повышению  $\sigma_u$  и  $\sigma_b$  и уменьшению  $\delta$  и  $\psi$ ; сталь при этом становится более хрупкой, например, среднеуглеродистая сталь марки Ст6 имеет  $\sigma_b \approx 600$  МПа,  $\sigma_u \approx 310$  МПа,  $\delta \approx 12\ldots15\%$  (рис. I.11, диаграмма 3).

Для создания высокопрочной стали с достаточно большими  $\delta$  и  $\psi$  при выплавке вводят в ее состав легирующие элементы – никель, хром, кобальт, медь и др. Такие стали называют легированными (рис. I.11, диаграмма 4). Например, хромокремнемарганцевая сталь марки 30ХГ2С имеет  $\sigma_b \approx 900$  МПа,  $\sigma_u \approx 600$  МПа и  $\delta \approx 13\%$ . Легирующие элементы облегчают закалку стали, увеличивая ее прокаливаемость. Это дает возможность иметь после специальной термической обработки существенно улучшенные структуру и механические 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 становится более мелкозернистой в сравнении с углеродистой, и прочностные ее свойства также насколько возрастают.

В случае необходимости большого повышения прочностных характеристик сталь после ее изготовления и прокатки подвергают термической обработке, например закалке и последующему отпуску, в процессе которых в результате образования мартенсита и продуктов его распада происходит принципиальное изменение структуры стали, что приводит к существенному повышению прочностных характеристик: предел текучести и прочности. При этом  $\sigma_b$  и  $\sigma_u$  оказываются более близкими по своему значению:  $\sigma_b \approx 1400$  МПа,  $\sigma_u \approx 1200$  МПа, а пластичность  $\delta \approx 6\ldots8\%$ . Приведенные механические характеристики относятся к легированной стали 30ХГ2С, прошедшей термическую обработку – закалку с  $900^{\circ}\text{C}$  с последующим отпуском при  $200^{\circ}\text{C}$ . 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. I.11, диаграммы 3 и 4), не имеющих площадки текучести,

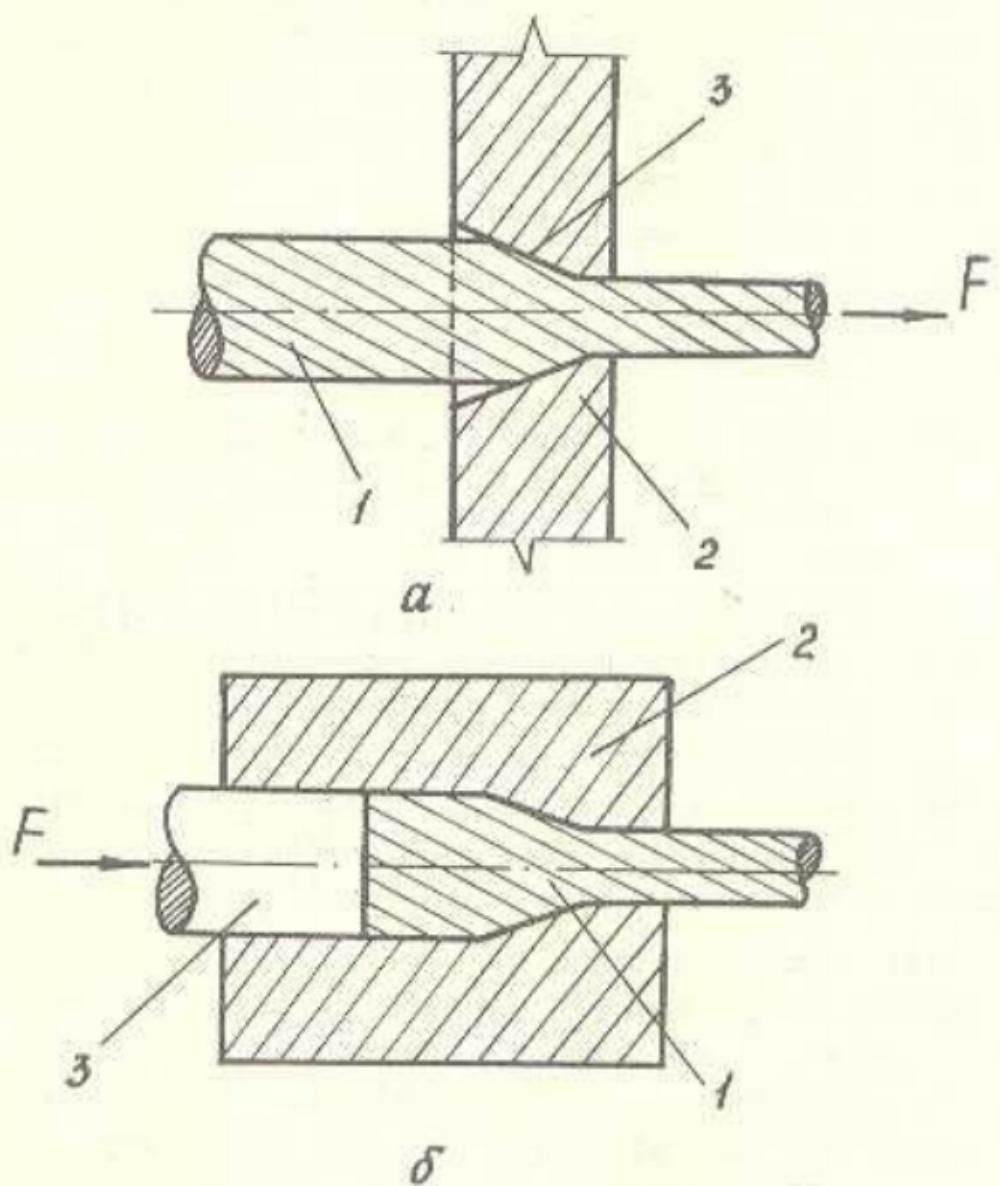


Рис.1.12. Возможные способы вытяжки стали а - при волочении:  
 1- стержень, 2- фильтра, 3 - заборный конус фильтра; б - при прессовании: 1 - заготовка, 2 - контейнер, 3 - поршень

определяют условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , который является основной расчетной характеристикой прочности таких материалов. Если легированная сталь прошла закалку с низкотемпературным отпуском (рис. I-II, диаграмма 5), ее можно отнести к категории твердых сталей, для которых основной характеристикой прочности является  $\sigma_b$ , как у хрупких материалов.

Все приведенные диаграммы имеют почти одинаковый угол наклона к оси абсцисс, что соответствует постоянному модулю упругости.

#### I.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. I.13). Металлическую основу чугуна повсеместно прорывают графитные включения, которые являются концентраторами напряжений. В процессе приложения внешней силы при испытании на центральное растяжение или сжатие излом проходит по графитным включениям с разрушением соединяющих их металлических перемычек.

##### 2. Разрушение бетона

Бетон состоит из заполнителей, например крупного щебня, керамзита или гравия и мелкого песка, а также вяжущего вещества – различных видов цемента и воды. При твердении все компоненты бетона соединяются в монолит (рис. I.14). При этом в массиве бетона между крупными фракциями заполнителя образуются микротрещины за счет объемных эффектов при неизномерной усадке, обусловленной уменьшением объема. Трещины также возникают за счет уменьшения содержания 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.

Хрупкие материалы при любом нагружении не упрочняются, что обусловлено началом микроразрушения, т.е. деструкции, при малых напряжениях.

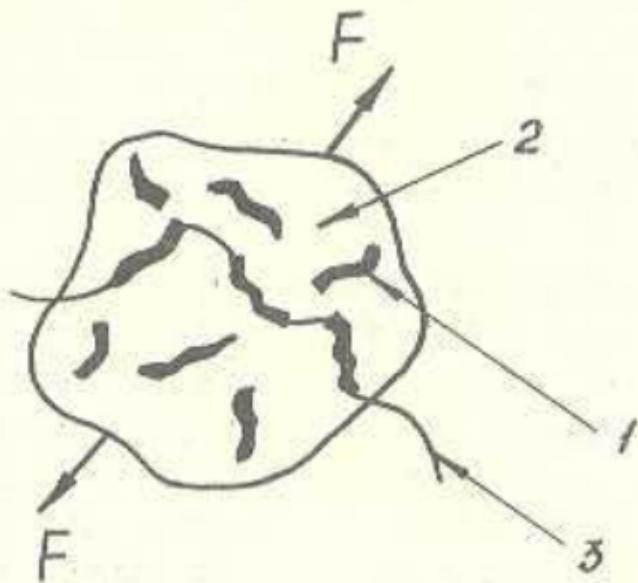


Рис. I.13. Разрушение чугуна: 1 - графитные включения, 2 - металлическая основа, 3 - трещина

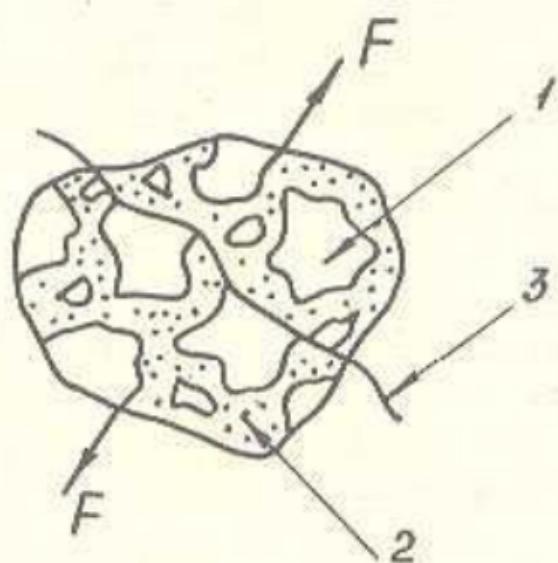


Рис. I.14. Разрушение бетона: 1 - цемент, 2 - песок с вяжущим веществом, 3 - трещина

## I.5. ПОВЕДЕНИЕ ПЛАСТИЧНЫХ И ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ

### 1. Физическая природа наклена

Изменение структуры и свойств металла в результате предварительного нагружения выше предела текучести называется наклена (схема 3.1).

После повторного растягивающего нагружения сталь упрочнилась (рис. I.11, диаграмма 2). Этот вид наклена является полезным\* и может быть использован в технике с целью упрочнения тросов и цепей для грузоподъемных машин, проводов, арматурной стали железобетона и т.д. Упрочнение стали при наклена в результате предварительного растяжения обусловлено сдвиговыми деформациями и поворотами кристаллографических плоскостей зерен, приводящими к искажению кристаллической решетки и заклиниванию плоскостей скольжения. При повторном нагружении затрудняется пластическая деформация и повышаются пределы пропорциональности и текучести, а предел прочности практически остается тот же, поскольку эта величина связана с хрупким разрушением, энергия которого мало изменяется в ходе деформации при одноосном (центральном) растяжении.

Предварительное растяжение, применяемое с целью упрочнения стали, является самым невыгодным напряженным состоянием, называемым в упругопластической области – зоне упрочнения – образование микротреции в связи с нарушением межатомных связей. В случае необходимости существенного повышения предела прочности сталь протягивают через фильтры (рис. I.12), что приводит в результате деформации к образованию объемного или плоского напряженного состояния. При данном упрочнении количество микротреций гораздо меньше и не создаются условия для их развития, так как всестороннее или частичное обжатие препятствует нарушению межатомных связей и тем самым повышает предел прочности.

### 2. Поведение бетона при повторных сжимающих нагрузках

При работе бетона в сжатых конструкциях деформации его обычно бывают упругопластическими. Если быстро образец нагрузить от нуля

\* Может быть вредным, например, при пробивке отверстий под заклепки, так как материал у краев отверстия охрупчивается, что способствует появлению микротреций, опасных при эксплуатации.

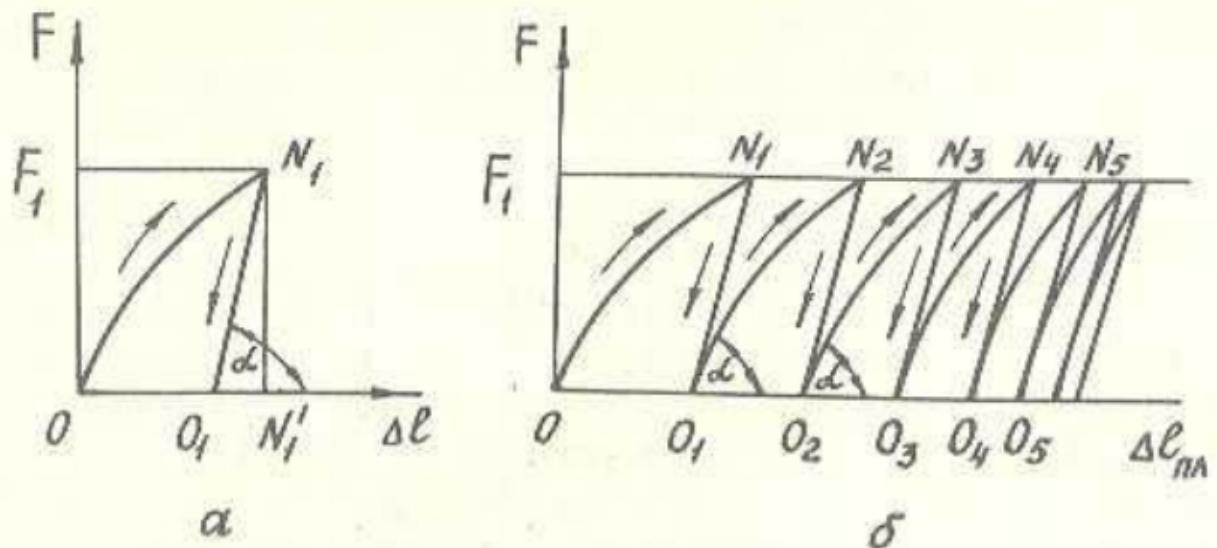


Рис. I.15. Кривые изменения пластических деформаций в бетоне в зависимости от напряжений сжатия:  
а - при единичном нагружении и разгрузке;  
б - при повторных нагрузках и последующих разгрузках

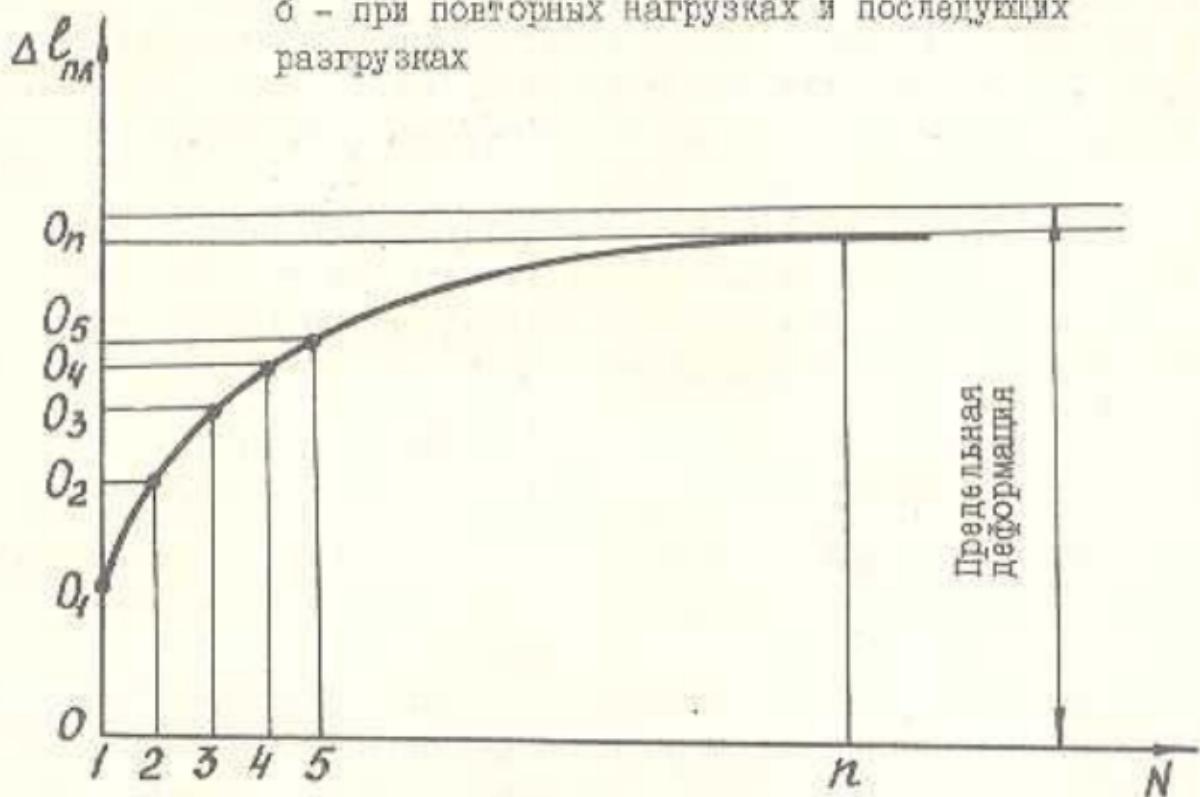


Рис. I.16. Изменение пластической деформации бетона в зависимости от числа нагрузений

до силы  $F_1$  и разгрузить (рис. I.15а), то пластическая деформация на диаграмме сжатия определится отрезком  $OO_1$ , а упругая —  $O_1N_1'$ . Как видно, нагрузка будет упругопластическая, а разгрузка — упругая.

При повторных быстрых циклических нагружениях от нуля до силы  $F_1$  происходит накапливание пластических деформаций  $OO_1$ ,  $O_1O_2$ ,  $O_2O_3$ ,  $O_3O_4$  и т.д., прирост которых при последующих нагружениях уменьшается и стремится к нулю при большом числе нагружений  $n$  (рис. I.15б). Здесь так же, как и при однократном нагружении, показанном на рис. I.15а, разгрузка упругая, с постоянным углом наклона ( $\tan \alpha = E = \text{const}$ , 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,  $n$ -м нагружении, приведена на рис. I.16. По оси абсцисс отложено число нагружений, по оси ординат — пластические деформации  $\Delta \ell_{pl}$ . Как видно, при повторных нагрузках до одного и того же напряжения в бетоне накапливаются пластические деформации. Если в результате воздействия на образец повторных скользящих нагрузок этот образец получил остаточную деформацию, близкую к предельной, то диаграмма сжатия такого бетона стремится к идеально упругой. Такой "приспособившийся" пластически обработанный бетон после снятия нагрузки не будет иметь пластических деформаций даже при многократных циклах и сможет, не разрушаясь, работать длительное время при данной нагрузке.

## 1.6. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОДУЛИ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛА

Большинство задач в строительстве и ряд задач машиностроения решаются 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 происходит изменение прочностных и пластических характеристик. На рис. I.17 показаны две диаграммы растяжения пластичной стали СтЗ: диаграмма 1 — при статическом и диаграмма 2 — при очень быстром (например, удар) нагружении. При увеличении скорости нагружения прочностные характеристики многих металлов, в частности стали, растут, а пластические уменьшаются, в резуль-

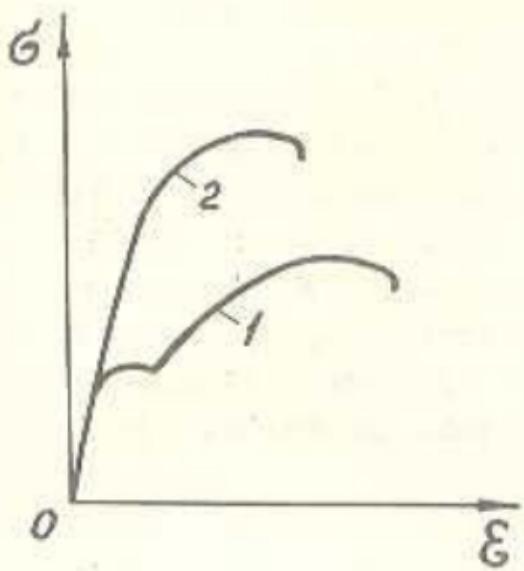


Рис. 1.17. Диаграмма растяжения пластичной стали:  
I - статическое нагружение, 2 - очень быстрое нагружение.

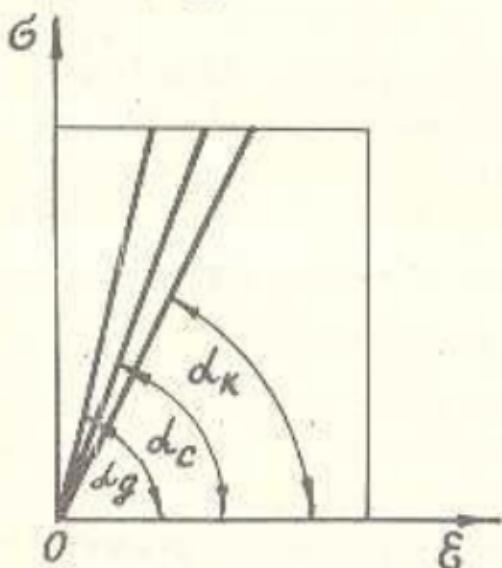


Рис. 1.18. Изменение модулей упругости в зависимости от вида и скоростей нагружения:  $E_c = \operatorname{tg} \alpha_c$  - статический;  $E_k = \operatorname{tg} \alpha_k$  - динамический при колебательных процессах;  $E_g = \operatorname{tg} \alpha_g$  - динамический при ударе

тате чего пластичный материал по своим свойствам приближается к хрупкому.

Рассмотрим, как изменяются модули упругости в зависимости от скорости и вида нагружения. Как известно, модуль упругости  $E$  на диаграмме растяжения  $\sigma = f(\varepsilon)$  определяется тангенсом угла наклона  $\alpha$  прямолинейного участка диаграммы к оси абсцисс. На рис. I.18 схематически показаны упругие участки диаграммы для случаев статического нагружения, удругих колебаний и удара:

а)  $E_c = t g \alpha_c$  - статический, или релаксированный, он же изотермический модуль упругости. Определяется при статическом растяжении, когда образец находится в тепловом равновесии с окружающей средой. При расчетах конструкций  $E_c$  обозначается  $E$ ;

б)  $E_k = t g \alpha_k$  - динамический модуль, измеряемый при колебательных процессах. Является тангенсом угла наклона оси динамической петли гистерезиса в координатах  $\sigma = f(\varepsilon)$ ; используется при расчетах резонансных систем;

в)  $E_g = t g \alpha_g$  - динамический модуль, нерелаксированный, или адиабатический. Определяется при ударе, т.е. очень быстром нагружении, когда образец не успевает обменяться теплом с окружающей средой.

В курсе "Сопротивление материалов" при точности расчета  $\approx \pm 5\%$  принято допущение о равенстве статического и динамического модулей упругости.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА ТРЕЩИН

### 2.1. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ

Материалы, работающие в качестве деталей машин строительных конструкций и инструмента, отличаются по своей прочности от тех же материалов, испытанных в виде образцов в условиях статического нагружения, в частности на разрывных машинах.\* Это связано с различием условий эксплуатации деталей в конструкции и испытаний образцов.

\* Обычные механические испытания образцов необходимы для составления паспортных данных материалов, в частности для их маркировки. Получаемые механические характеристики используются при расчетах статически нагруженных и других конструкций.

Известно, что в статических условиях нагружения можно получать очень высокие уровни прочности стали и сплавов. Применение термической обработки стали в сочетании с механическими воздействиями, т.е. так называемой термомеханической обработки (например, закалки, отпуска с последующим волочением), позволяет получать на среднеуглеродистой стали прочностные характеристики  $\approx (3000...3500)$  МПа. Но, к сожалению, эта высокая прочность не может быть использована в современных конструкциях, более того, она может оказаться даже вредной (рис. 2.1). При знакопеременной нагрузке прочность деталей машин определяется пределом выносливости  $\sigma_R$ , т.е. наибольшим значением максимального напряжения, при котором образец не разрушается при неограниченно большом числе циклов нагружения.\* На графике (рис. 2.1) показано, что при низкой прочности стали, когда предел текучести  $\sigma_T < 600$  МПа,  $\sigma_R$  примерно соответствует  $\sigma_T$ . При дальнейшем увеличении прочности стали  $\sigma_R$  сначала слабо возрастает, затем практически не изменяется, а при очень высокой прочности даже падает. Следовательно, чрезмерно большая прочность стали и других материалов в данном случае по меньшей мере бесполезна, так как может привести к низкой выносливости, т.е. к раннему разрушению конструкции за счет образования и роста трещин в поле переменных напряжений.

Отсюда появилось понятие так называемой конструкционной прочности, под которой подразумевают прочность материала в реальной конструкции, подвергающей эксплуатации в условиях переменных напряжений, повторного удара, сложного напряженного состояния, высокой температуры, агрессивных сред и т.д. в отличие от прочности того же материала в образцах при статическом нагружении. Конструкционная прочность определяет сопротивление разрушению деталей машин при их работе в сложных условиях нагружения, когда без возрастаания нагрузки при напряжениях, меньших статического предела прочности, а иногда даже текучести, в материале возникают и расщепляются трещины, приводящие к разрушению. Следовательно, конструкционная прочность материала определяется его сопротивлением распространению трещин в заданных условиях эксплуатации, что характеризует надежность и работоспособность материала. Нередко бывает так, что уже имеющиеся в материале, но заторможенные, например, прочными структурными составляющими, трещины оказываются

\* Предел выносливости  $\sigma_R$  показан на кривой усталости (схема 3.3).

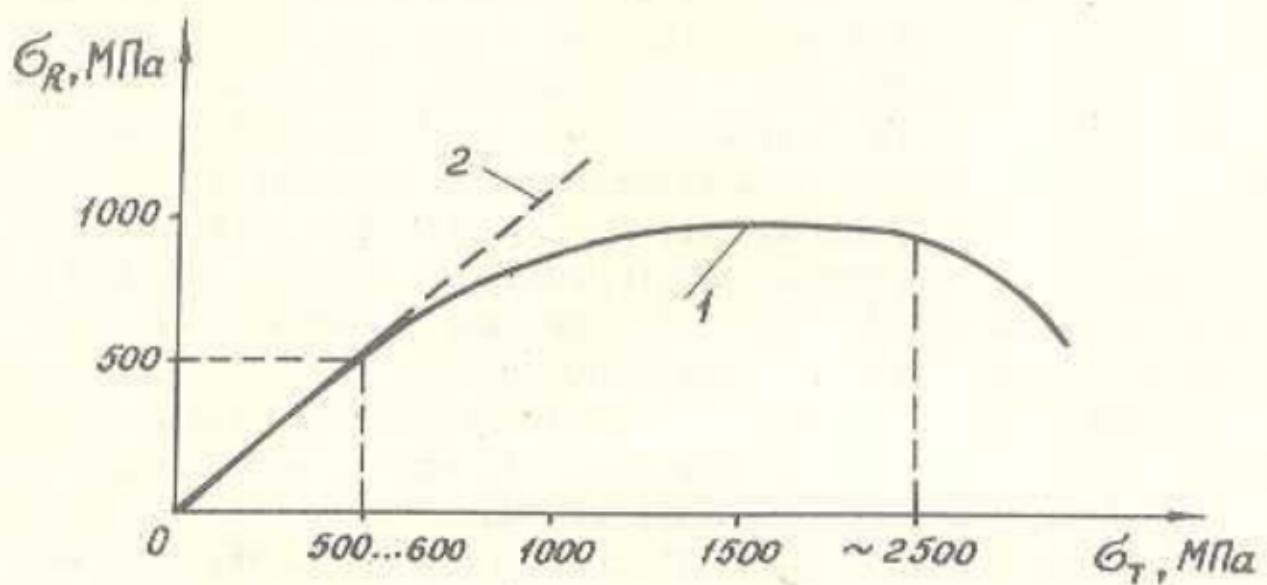


Рис.2.1. График зависимости предела выносливости  $\sigma_R$  от предела текучести  $\sigma_y$ : I - сталь; 2 - композит

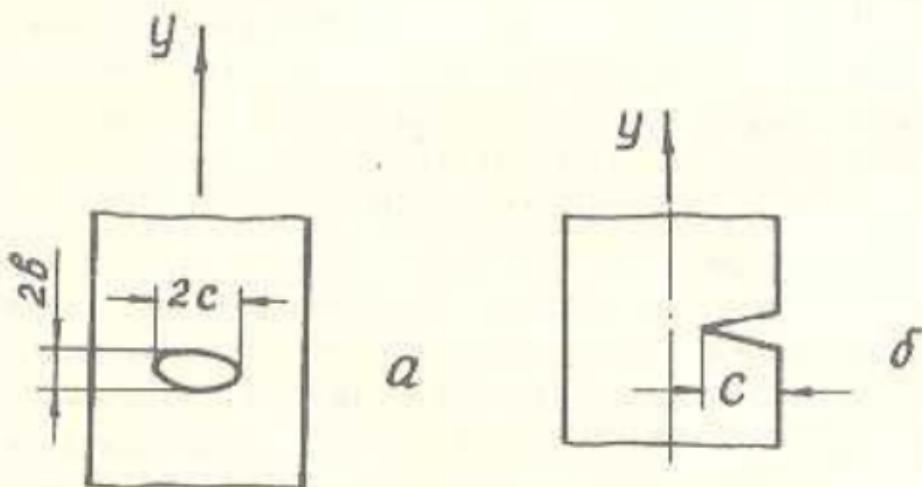


Рис.2.2. Виды трещин: а - эллипсовидная трещина Гриффитса; б - клиновидная трещина Ребиндера

неподвижными, а значит, безопасными, и деталь разрушается в результате зарождения и роста новых незаторможенных и опасных трещин, перерезающих ее поперечное сечение. Рост трещин могут задерживать поля остаточных напряжений скатия, расположенные около их вершин.

Для решения проблемы конструкционной прочности необходимо прежде всего рассмотреть методы определения сопротивления материалов распространению трещин и так называемые композиционные (искусственные) материалы. Конструируют эти материалы так, что в опасных местах сечения деталей располагают преграды, энергично сопротивляющиеся распространению трещин.

## 2.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИН И РАЗРУШЕНИЕ

В металлах, сплавах и др. конструкционных материалах при деформации легко зарождаются микротрещины. Если того, они, как правило, уже имеются, являясь структурными дефектами, в частности, вследствие дислокационных реакций, возникающих в процессе изготовления и обработки материалов. Механическая обработка приводит к появлению надрезов на поверхности деталей и образцов. Надрезы и трещины являются концентриаторами напряжений, всегда присутствующими в реальном материале, поэтому практической стадией разрушения является не возникновение трещины, а ее распространение. Условия равновесия трещин в материале в упругом поле и их влияние на прочность рассматриваются в линейной механике разрушения, которая описывает напряженное состояние у фронта развивающейся трещины и объясняет, почему хрупкое разрушение происходит при значительно более низких напряжениях, чем вязкое.

В науке о разрушении материалов обычно обсуждаются два вида трещин: эллипсовидные – А.Гриффита (рис.2.2а) и клиновидные – П.А.Ребиндера (рис.2.2б). Гриффитс первый создал теорию распространения эллипсовидных трещин, которая получила хорошее экспериментальное подтверждение при хрупком разрушении ряда материалов, таких, как стекло, высокопрочные стали, бетон, чугун и др. Трещины Ребиндера представляют большую важность при изучении влияния поверхностно-активных веществ на растрескивание материалов, например, растрекания расплавов некоторых легкоплавких металлов по поверхности тугоплавких. В частности, расплав галлия вызывает растрескивание алюминия, индия – железа и стали при очень

небольших напряжениях.

Большое значение в науке имеет так называемый критерий Гриффитса, который определяет величину напряжений, соответствующую распространению трещины критического размера, т.е. минимальной по длине трещины, способной к росту:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi c_{kp}}}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  - поверхностная энергия, приходящаяся на единицу поверхности трещины и являющаяся мерой расхода энергии при раскрытии трещины;  $E$  - модуль упругости;  $c_{kp}$  - критическая длина трещины.

Формула (1) представляет собой запись критерия Гриффитса для наиболее распространенного случая роста трещин в условиях плоского напряженного состояния и реализуется при хрупком разрушении (рис. I.10б).

Орован испытал на растяжение образцы малоуглеродистой стали с острым надрезом при комнатной температуре, т.е. при вязком разрушении (структура подобна представленной на рис. I.10а), и обнаружил, что энергетические затраты на пластическую деформацию в приповерхностных слоях у трещин могут на несколько порядков величины (в 100-1000 раз) превышать  $\gamma$ .

Критерий Орована

$$\sigma = \sqrt{\frac{2(P + \gamma)E}{\pi c_{kp}}}, \quad (2)$$

где  $P$  - работа пластической деформации приповерхностной зоны трещины.

При хрупком разрушении  $P \ll \gamma$  значением  $P$  можно пренебречь, и критерий Орована превратится в критерий Гриффитса (1); при вязком разрушении  $P \gg \gamma$ , и Орован пренебрегает величиной  $\gamma$ , т.е. критерий Орована для вязкого разрушения

$$\sigma = \sqrt{\frac{2PE}{\pi c_{kp}}}. \quad (3)$$

Как видно, формула (2) может характеризовать как хрупкое, так и вязкое разрушение.

В условиях вязкого разрушения особое значение приобретает острота трещины. Это отражено в еще одном видоизмененном Орованом уравнении Гриффитса:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma_{\text{эфф}} E}{\pi C_{kp} a}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — радиус при вершине трещины;  $\alpha$  — межатомное расстояние;  $\gamma_{\text{эфф}} = P + \gamma$ .

Последняя формула показывает, что напряжение разрушения возрастает при затуплении трещины у ее вершины. Следовательно, критерий Гриффитса (1) применим к кристаллическому телу при  $\rho = \alpha$ . В этом случае он тождествен критерию Орована (2), когда трещины имеют предельно возможную остроту, т.е. радиус острия равен межатомному расстоянию. Следует отметить, что в этом случае трещины А.Гриффитса превратятся в трещины П.А.Ребиндера, и у вершины этих трещин в силу концентрации напряжений величина  $\sigma = \sigma^T$  — величина теоретической прочности, что достаточно строго обосновано М.А.Кришталом и автором. Теоретическая прочность соответствует максимально возможной прочности материала, следующей из величины силы межатомной связи, и оценивается как

$\sigma^T = E / 2\pi$  (например, для стали  $\sigma^T \approx 35000$  МПа). Атомарно острые трещины легко перемещаются, разрезая материал. Учет концентрации напряжений у трещины критического размера, чего не было сделано Гриффитсом, позволяет без концепции Орована, т.е. формулы (4), получить строго тот же результат — необходимость иметь в материале критические трещины с почти моноатомной острой вершиной к моменту начала ее перемещения. Такая трещина, перемещаясь, zunächst будет разрезать материал без его деформирования и, только достигнув достаточно большой длины, продвигаясь, приведет к значительной деформации приповерхностных слоев у поверхности разрушения, т.е. перейдет в вязкую, что бывает при ее затуплении. Критические трещины, следовательно, атомарно острые и являются трещинами П.А.Ребиндера, а не Гриффитса.

### 2.3. ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ И КРИТЕРИЙ $K_{Ic}$ ДЛЯ АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Орован расширил применение теории Гриффитса для объяснения особенностей образования и роста трещины в кристаллических телах, однако не устранил основного ее недостатка — невозможности прогнозировать поведение материала в конструкциях на основе предварительных испытаний лабораторных образцов. Существенным шагом вперед было введение критерия вязкости разрушения — энергетического критерия Ирвина, который определяет механику разрушения и может быть измерен экспериментально.

Весьма важно знать, какое напряжение необходимо для распространения трещины. Оно зависит не только от материала, но и от конструкции, так как она определяет локализацию и конфигурацию трещины и распределение напряжений в ее окрестности.

Ирвин и Орован принимают, что в кристаллических телах основной в распространении вязкой трещины является работа пластической деформации. Процесс распространения трещины в напряженном материале характеризуется удельным расходом энергии  $G$ , т.е. энергии, приходящейся на единицу поверхности трещины. Ирвин показал, что

$$G = \frac{F}{2} \cdot \frac{\delta\varepsilon}{\delta c}, \quad (5)$$

где  $F$  — нагрузка;  $\delta\varepsilon$  и  $\delta c$  — малые приращения деформации и длины трещины; ширина трещины принята равной единице.

Измеряя  $\varepsilon$  как функцию размера длины трещины, находят  $G$ . Экспериментально наблюдаемый переход от медленного роста трещин к быстрому разрушению характеризует величину  $G$ , которая является мерой сопротивления перемещению трещин при разрушении, т.е. вязкостью разрушения. Иными словами, вязкость разрушения — способность материала блокировать развитие трещин. Величина тождественна  $\mathcal{J}_{\text{Эфф}} = P + \mathcal{J}$  в формулах (2) и (4). Чем больше  $G$ , тем труднее развивается разрушение.

В практике работы лабораторий получил большое распространение другой критерий сопротивления разрушению Ирвина — критерий интенсивности напряжений  $K$ , который по своей природе в общем эквивалентен энергетическому критерию  $G$ . Оба эти критерия ха-

рактеризуют конструкционную прочность материала. Разрушение наступает тогда, когда достигается критическое распределение напряжений, определяемое коэффициентом интенсивности напряжения  $K_c$  в устье трещины. Коэффициент  $K_c$  определяется приложенным напряжением и геометрией трещины. Величину  $K_c$ , как и  $G$ , измеряют экспериментально и называют вязкостью разрушения.

При симметричном распределении напряжений относительно плоскости трещины, расположаемой перпендикулярно линии действия приложенной силы (к чему стремятся при исследованиях), критерий вязкости разрушения обозначают  $K_{Ic}$  (рис. 2.4а). Это наиболее часто используемая величина, связывающая значение средних напряжений в момент разрушения с критической длиной трещины, характерной для исследований (по Ирвину) в условиях плоского напряженного состояния:

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\alpha \pi c_{kp}}, \quad (6)$$

где  $\alpha = 0,5 \dots 2,5$  – для внутренних эллиптических трещин; часто полагают  $\alpha = 1$ .

Критерий  $K_{Ic}$  измеряют экспериментально в  $\text{кгс}/\text{мм}^{3/2}$   $\text{Н}/\text{мм}^{3/2}$  и  $\text{МН}/\text{м}^{3/2}$ . Его, как и  $K_c$ , называют вязкостью разрушения. Эта величина описывает поле нормальных напряжений  $\sigma_y$  (рис. 2.3) впереди вершины трещины. Она численно равна величине напряжений, которые достигаются обычно на расстоянии 0,4 мм впереди вершины трещины в момент разрушения.

Критерий  $K_{Ic}$  определяют на образце с надрезом, на дне которого дополнительно наносят острую усталостную трещину. Ее обычно получают на вибраторах, например вибраторе Дроздовского. Некоторые современные машины, в частности американский испытательный комплекс  $MTS$ , позволяют делать такую же трещину с помощью специального ножа из очень твердой иридиевой стали. Эта первичная трещина необходима для определенности испытания и играет роль критической трещины. При нагружении образца (лабораторная работа 5.1) такая трещина сначала распространяется медленно (пластическое разрушение), а затем, после постепенного увеличения нагрузки, быстро. Переход к быстрому разрушению характеризует значение  $K_{Ic}$ , т.е. вязкость разрушения. Его удобно наблюдать, присоединив к образцу датчик прибора акустической эмиссии (АЭ),

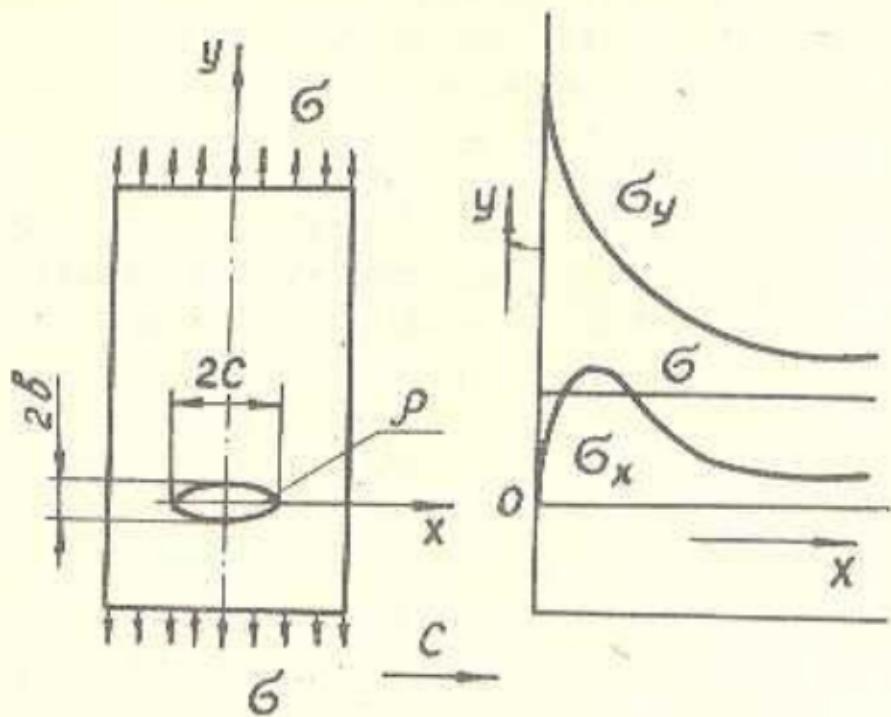


Рис.2.3. Распределение напряжений около эллиптической трещины

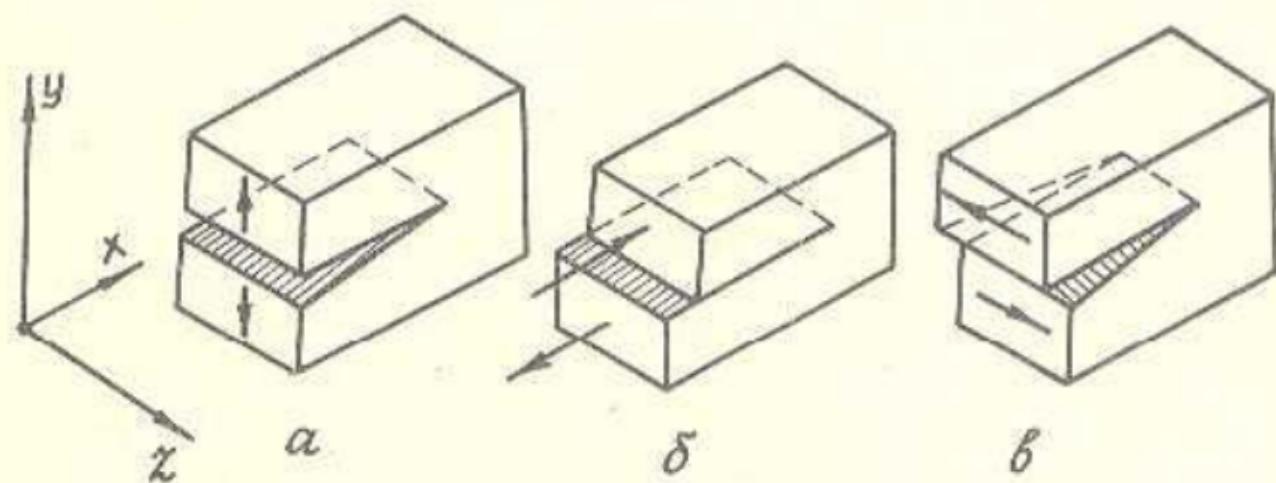


Рис.2.4. Три типа трещин: а - отрыва;  
б - поперечного сдвига;  
в - продольного сдвига

например, Хабаровского филиала НИИФТРИ или более простого – ТолИИ, который покажет резкое (скачкообразное) возрастание сигнала АЭ при переходе от медленного разрушения к быстрому.

Конструирование образца необходимо выполнять так, чтобы деформация была плоской, о чём свидетельствует отсутствие скосов на изломе. Тогда  $K_c$  имеет стабильное, не зависящее от толщины образца значение  $K_{Ic}$ . Большая величина  $K_{Ic}$  свидетельствует о большом сопротивлении материала распространению трещин, т.е. разрушению.

Приведем ориентировочные числовые значения  $K_{Ic}$  некоторых материалов. Например, для дюралюминия и марганцовистой стали  $K_{Ic} = 110 \text{ MN/m}^{3/2}$ , для меди и титана  $K_{Ic} = 90 \text{ MN/m}^{3/2}$ . Анизотропные композиционные материалы обладают анизотропией вязкости, например, углепластик имеет вязкость вдоль и поперек волокон соответственно 2 и  $105 \text{ MN/m}^{3/2}$ .

Применение  $K_{Ic}$  как критерия конструкционной прочности позволяет решать целый ряд задач, например, рассчитывать максимально допустимую нагрузку на конструкцию с трещиной известных размеров, при которой еще не началось ее быстрое развитие, приводящее к разрушению; определять критические размеры трещины при заданном уровне напряжений по формуле

$$C_{kp} = \frac{2\gamma F}{\pi \sigma^2} = \frac{K_{Ic}^2}{\pi \sigma^2}. \quad (7)$$

Внедрение все более прочных (и, как правило, более хрупких) материалов: высокопрочных сталей, металлокерамики, стеклопластиков (СВАМ), материалов, армированных "усами" (нитевидными монокристаллами с весьма совершенной структурой и прочностью – порядка теоретической) и т.д. – привело к необходимости расчета конструкций на трещиностойкость. При наличии достаточного количества экспериментальных данных с учетом условий нагружений расчет может быть выполнен в виде проверки устойчивости трещин:  $K_i < K_{Ic}$  (8). Здесь  $i = I, II, III$  соответствует типу трещины (рис. 2.4). Например,  $K_I$  – вязкость разрушения при отрыве относится к I типу трещин (рис. 2.4а). Вязкость разрушения соответственно при поперечном и продольном сдвиге обозначается  $K_{II}$  (рис. 2.4б) и  $K_{III}$  (рис. 2.4в), причем  $K_{II} = K_{III} = \tau \sqrt{\pi c}$ , где  $\tau$  – номинальные касательные напряжения.

## 2.4. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Обычные методы изготовления и упрочняющей обработки конструкционных материалов не позволяют получать большую конструкционную прочность и высокую вязкость разрушения, т.е.  $K_{Ic}$ . Поэтому график (рис.2.1) начиная с уже сравнительно небольшой статической прочности ( $\sigma_T > 600 \text{ МПа}$ ) показывает отсутствие прямой пропорциональности между  $\sigma_R$  и  $\sigma_T$ . Для ее достижения необходимо в материал в месте вероятного возникновения трещин вводить упрочнитель, интенсивно препятствующий их перемещению.

На рис.2.5а приведен эскиз элемента коленчатого вала автомобиля. Указанные стрелками поверхности подвергают тщательной шлифовке и полировка. Тем не менее из-за концентрации напряжений обычно на этих поверхностях 1 зарождаются и растут нормально к ним усталостные трещины 2. На рис.2.5б изображен фрагмент того же вала в более крупном масштабе. Если бы удалось перпендикулярно трассе будущей трещины расположить упрочняющие волокна 3, трещина вынуждена была бы их перерезать, что значительно повысило бы вязкость разрушения и существенно затруднило перемещение трещин, т.е. замедлило разрушение. Такой упрочненный волокнами материал является композиционным. Сталь пока еще таким способом упрочняют редко. Обычно волокнами упрочняют алюминий, титан и другие материалы. При таком упрочнении  $\sigma_R$  в зависимости от  $\sigma_T$ \* изменился бы по пунктирной линии 2 (рис.2.1).

Композиционные материалы – это материалы будущего, но уже сейчас немыслимо представить себе авиационную и ракетно-космическую технику без применения композитов. В настоящее время создана теория таких материалов и разработаны основы технологий их изготовления и приемы конструирования.

Композиционные материалы нельзя непосредственно изготавливать традиционными методами металлургической технологии – литьем, обработкой металлов давлением и т.п. Приходится разрабатывать специальные технологии и поэтому такие материалы пока дороги, но уже получают внедрение в производство.

\* Обычно это условный предел текучести  $\sigma_{0.2}$  для высокопрочных металлов.

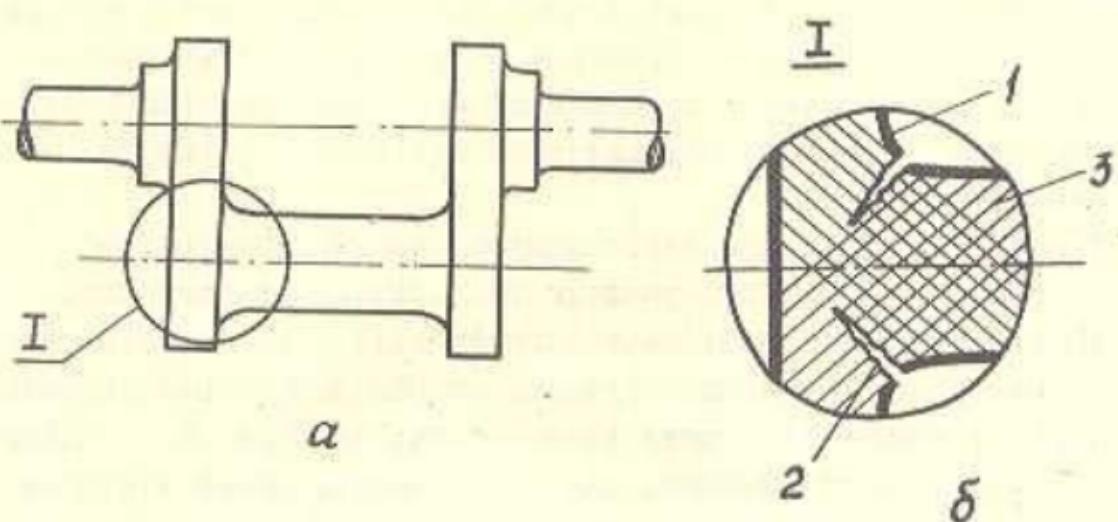


Рис.2.5. Эскиз элемента коленчатого вала автомобиля:  
 а - общий вид; б - фрагмент ( 1 - полированная поверхность, 2 - трещина, 3 - упрочняющее волокно )

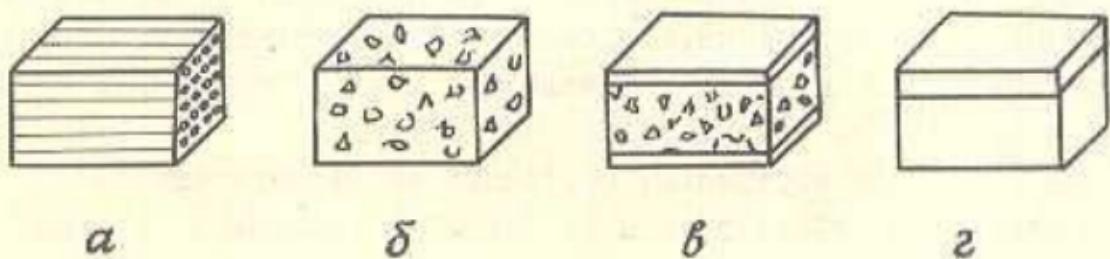


Рис.2.6. Виды композиционных материалов:  
 а - волокнистые; б - упрочненные дисперсными частицами; в - многослойные; г - биметаллы

Композиционными называют сложные материалы, в состав которых входят значительно отличающиеся по свойствам нерастворимые или малорастворимые друг в друге компоненты, разделенные в материале ярко выраженной границей. Примером естественных композиционных материалов могут служить стволы и стебли растений, кости человека и животных. Принцип создания композиционных материалов заимствован у природы.

Рассмотрим несколько видов композиционных материалов:

1. Упрочнение высокопрочными волокнами, например тонкой ( $\sim 20$  мкм) проволокой из нержавеющей стали и борними волокнами, сплавы алюминия, у которых в несколько раз возрастают удельные прочности и модуль упругости (т.е. отношение  $G_0$  к плотности). Такие изделия получают, сначала сконструировав и создав необходимый каркас из упрочняющих волокон, который заполняют металлической матрицей путем литья, порошковой металлургии и др. методами (рис.2.6а).

К композиционному материалу, в частности, можно отнести железобетон, у которого матрица – бетон армирована стальной арматурой в зоне растягивающих напряжений, опасных для бетона.

2. Дисперсионно-упрочненный композиционный материал, в котором наполнителями служат дисперсные частицы тугоплавких фаз ( $SiO_2$ ,  $BN$  и др.), распределенные между зернами матрицы, получаемой обычно методом порошковой металлургии. Такие сплавы имеют высокую конструкционную прочность и жаропрочность. Образовавшиеся микротреции плохо перемещаются между дисперсными частицами, и разрушение затрудняется (рис.2.6б).

3. Многослойные материалы, состоящие из перемежающихся слоев различных материалов, обычно металлов, например углеродистой и нержавеющей стали. Их получают совместной прокаткой нескольких тонких листов различных материалов, сложенных стопкой. При такой многослойной прокатке листы свариваются. Материал имеет высокую конструкционную прочность, так как отдельные составляющие листы подобраны так, чтобы препятствовать переходу трещин из одного листа в соседний (рис.2.6в).

4. Распространенным частным случаем многослойного материала являются биметаллы, например сталь Ст3–нержавеющая сталь (рис.2.6г). Этот материал с трудом разрушается, так как возникшие в углеродистой стали трещины вязнут в нержавеющей стали. Биметаллы

используют для изготовления сосудов высокого давления, например котлов, где необходима не только высокая конструкционная прочность, но и большое сопротивление коррозионному разрушению, что обеспечивается нержавеющей сталью.

Таким образом, смысл создания волокнисто-упрочненного композиционного материала состоит в том, чтобы получить материал, сочетающий высокую прочность волокон с пластичностью матрицы.\* При нагружении напряжения между волокнами и матрицей распределяются равномерно, максимальные напряжения имеют волокна. Композиционный материал обладает разно выраженной анизотропией, и модули упругости  $E$  в разных направлениях могут различаться в несколько раз. Упругие постоянные  $E$  и прочностные характеристики для композитов определяются не только при испытании образцов, но и путем расчета. Если известны модули упругости волокон и матрицы, то для волокнисто-упрочненного композита, у которого все волокна имеют одинаковые направления, модуль упругости композита

$$E_K = E_1 V_1 + E_2 V_2, \quad (9)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  — модули упругости волокон и матрицы;  $V_1$  и  $V_2$  — объемные доли этих составляющих в композите.

Предел прочности или текучести таких композитов

$$\sigma_K = \sigma_1 V_1 + \sigma_2^o (1 - V_1), \quad (10)$$

где  $\sigma_1$  — предел прочности или текучести материала волокон;  $\sigma_2^o$  — напряжения, действующие на матрицу в момент достижения  $\sigma_1^{**}$ ;  $V_1$  — объемная доля волокна в композите.

Прочностные характеристики биметаллов можно рассчитывать на основе свойств их составляющих по формуле, предложенной автором:

$$\sigma_K = \sigma_1 (1 - h) + \sigma_2 h, \quad (II)$$

\* За исключением железобетона и некоторых других композитов, где высокая прочность арматуры сочетается с хрупкой матрицей бетона.

\*\* Обычно в матрице не достигаются предельные напряжения (пределы прочности и текучести) к моменту нагружения волокон до  $\sigma_1$ , так как разрушение волокон в основном наступает раньше.

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - пределы текучести или прочности составляющих биметалла;

$$\eta = \frac{E'}{E_K} ; \quad h = \frac{E'}{E_2} .$$

Здесь  $E_K$  и  $E_2$  - модули упругости композита и его более прочной составляющей;  $E'$  - упругопластический модуль композита:

$$E' = E_K e^{-V_p/V}, \quad (12)$$

где  $V_p$  - объем разгруженного материала вследствие образования трещин;  $V$  - объем образца ( $V_p < V$ ).

Величину  $V$  определяют металлографически. Для наиболее распространенного биметалла углеродистая сталь - нержавеющая сталь  $e^{-V_p/V} \approx 0,8 \dots 0,7$ , исходя из  $V_p \approx 0,2 \dots 0,3$ , что было установлено многократными экспериментами.

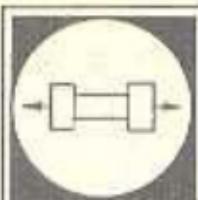
Для случая, когда модули упругости составляющих композита и самого композита мало отличаются друг от друга и могут быть приняты равными (например, сталь СтЗ и нержавеющая сталь), расчет можно вести по упрощенной формуле

$$\eta = e^{-V_p/V} \cdot \frac{\sigma_K}{\sigma_1(1-\eta) + \sigma_2 \eta}, \quad (13)$$

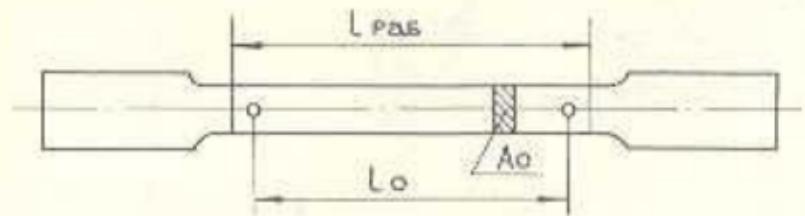
Расчеты по формулам (11) и (13) предполагают известными все входящие в них величины, в том числе  $E'$ , который определяется не из диаграммы растяжения, а на основании особенностей структурных изменений биметалла на стадии упрочнения.

Испытания водокисло-упрочненного композита и биметалла также, как и образцов стали, можно проводить на универсальных испытательных машинах, например Р-10 (рис.3.1).

Из рассмотренных примеров видно, что, создавая образцы композитов из различных материалов, можно с достаточной точностью определить их прочность и жесткость по характеристикам составляющих. Но образцы композита и изготовленная из них деталь машины (рис.2.5) - далеко не одно и то же. Композит не изготавливают заранее, он должен создаваться вместе с деталью с учетом ее конфигурации и эксплуатационных требований. Поэтому для создания конструкций из композитов необходимы комплексные знания различных специалистов: механиков, физиков, материаловедов и технологов.

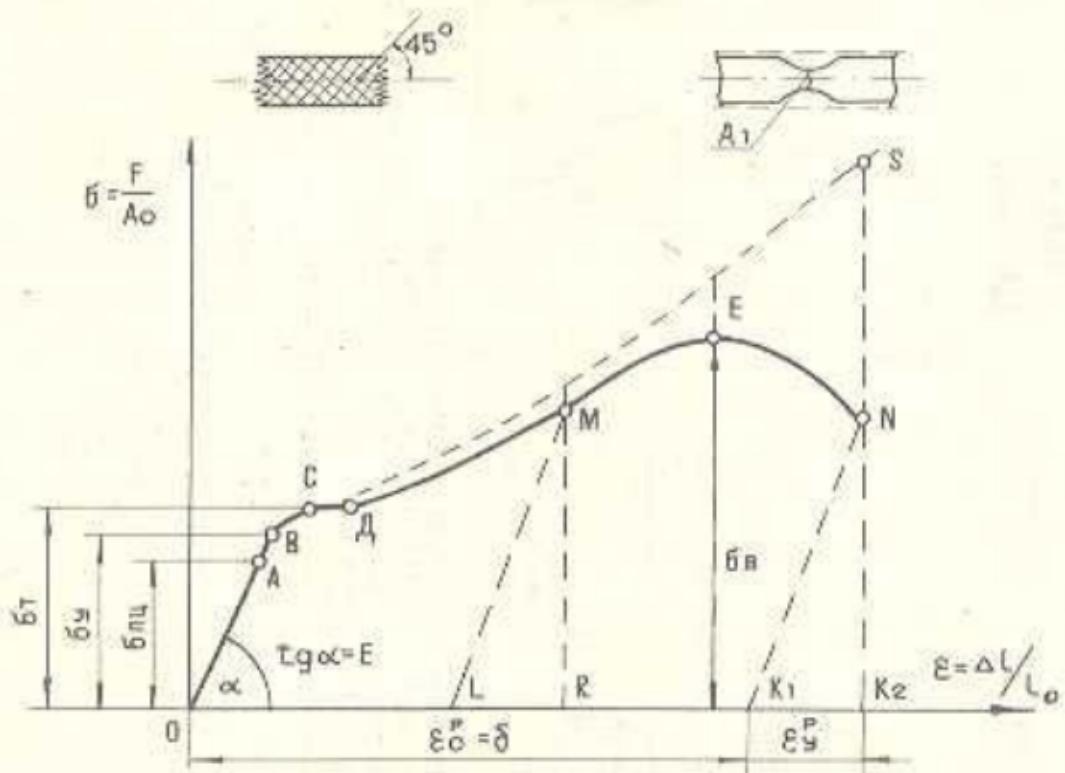


РАСТЯЖЕНИЕ



$L_0 = 10 \text{ do}$

## ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ



## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

## ПРОЧНОСТИ:

бпц - ПРЕДЕЛ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ

**бү - ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ**

БТ - ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ

6в - ПРЕДЕЛ линейности

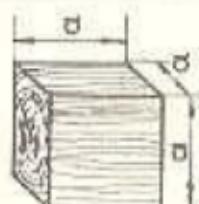
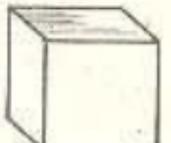
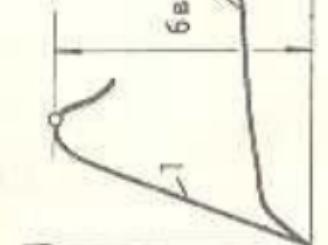
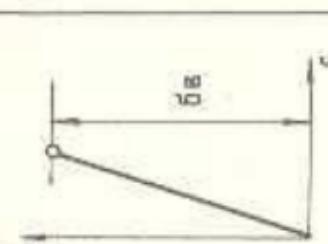
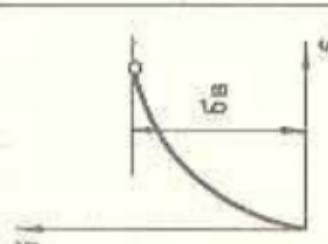
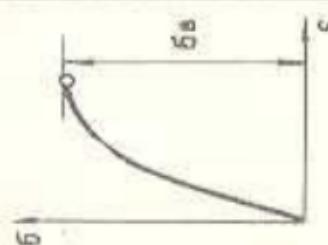
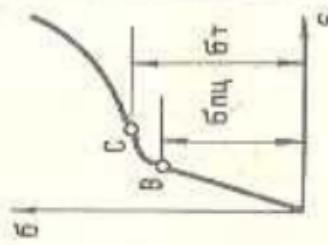
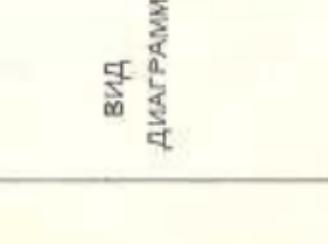
ПЛАСТИЧНОСТИ:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

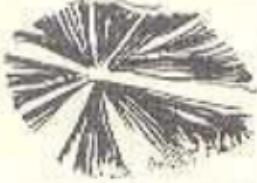
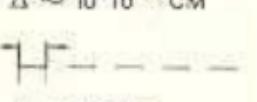
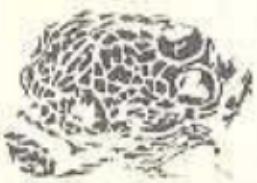
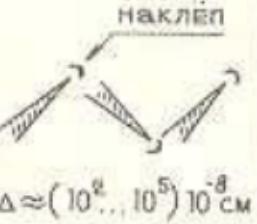
## ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ОСТАТОЧНОЕ УДЛИНЕНИЕ ПОСЛЕ РАЗРЫВА

$$\Psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%$$

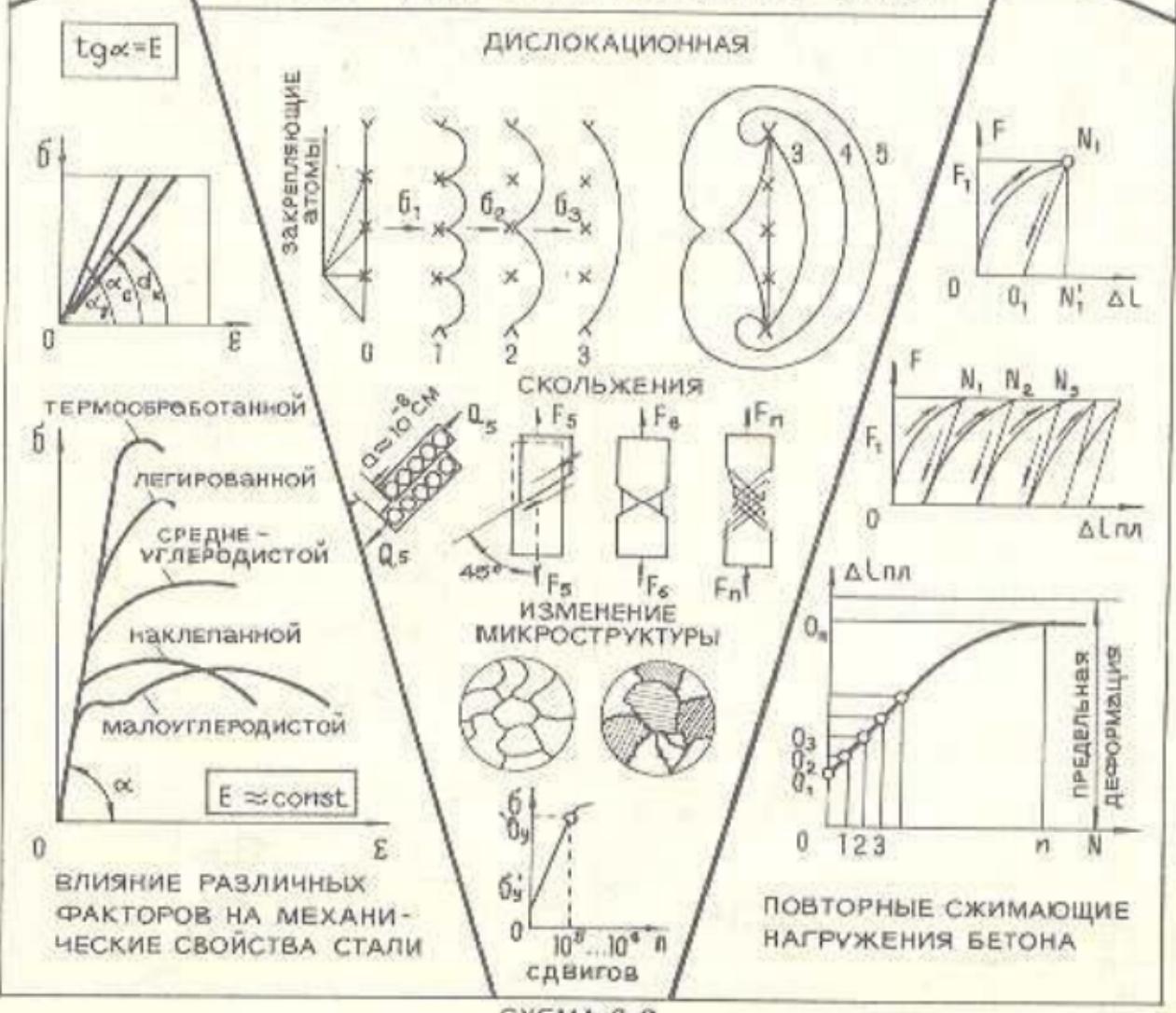
## ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ОСТАТОЧНОЕ СУЖЕНИЕ ПОСЛЕ РАЗРЫВА

МАТЕРИАЛ		ДЕРЕВО			
СТАЛЬ	ЧУГУН	БЕТОН	КАМЕНЬ ЦЕМЕНТ	1 ВДОЛЬ ВОЛОКОН	2 ПОПЕРЕК ВОЛОКОН
СЖАТИЕ					
					
					
					
					
					

# МЕХАНИЗМЫ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

СПОСОБЫ	ВИЗУАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	МИКРО- СКОПИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	СХЕМАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ТРЕЩИНЫ	ХРУПКИЕ МАТЕРИАЛЫ
РАЗРУШЕНИЕ	ХРУПКОЕ →			$\Delta \approx 10 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ 
	ПЛАСТИЧЕСКОЕ →			 наклеп $\Delta \approx (10^8..10^5) 10^{-8} \text{ см}$

## СХЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ



НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛИЯЮТ:

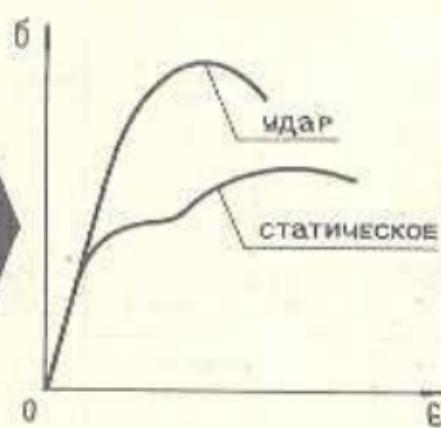
НАГРУЖЕНИЕ

+

Т ТЕМПЕРАТУРА

$v_n$

СКОРОСТЬ



H

ПОВТОРНОСТЬ



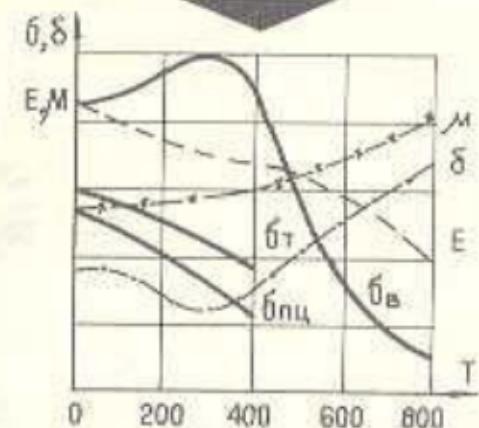
T

ПЕРЕМЕННОСТЬ



=

УСТАЛОСТЬ



+

t

ВРЕМЯ



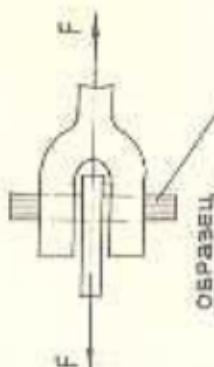
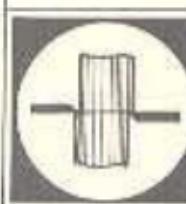
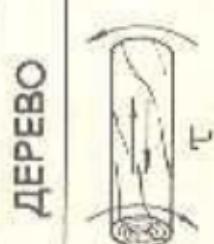
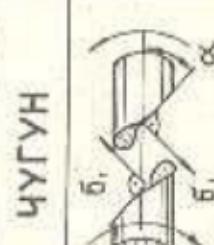
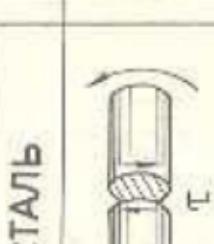
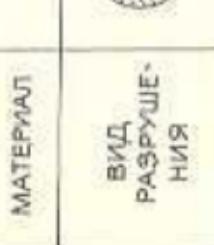
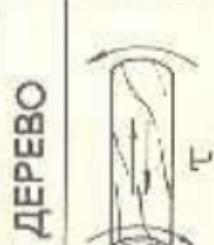
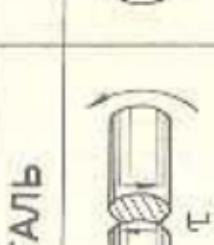
=

ПОЛЗУЧЕСТЬ

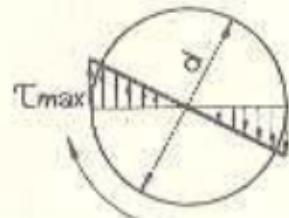
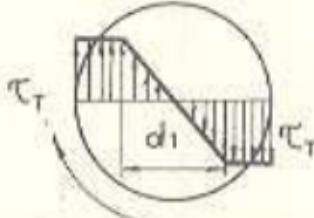
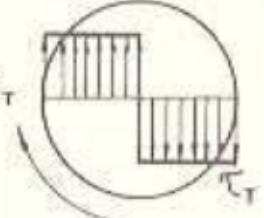


=

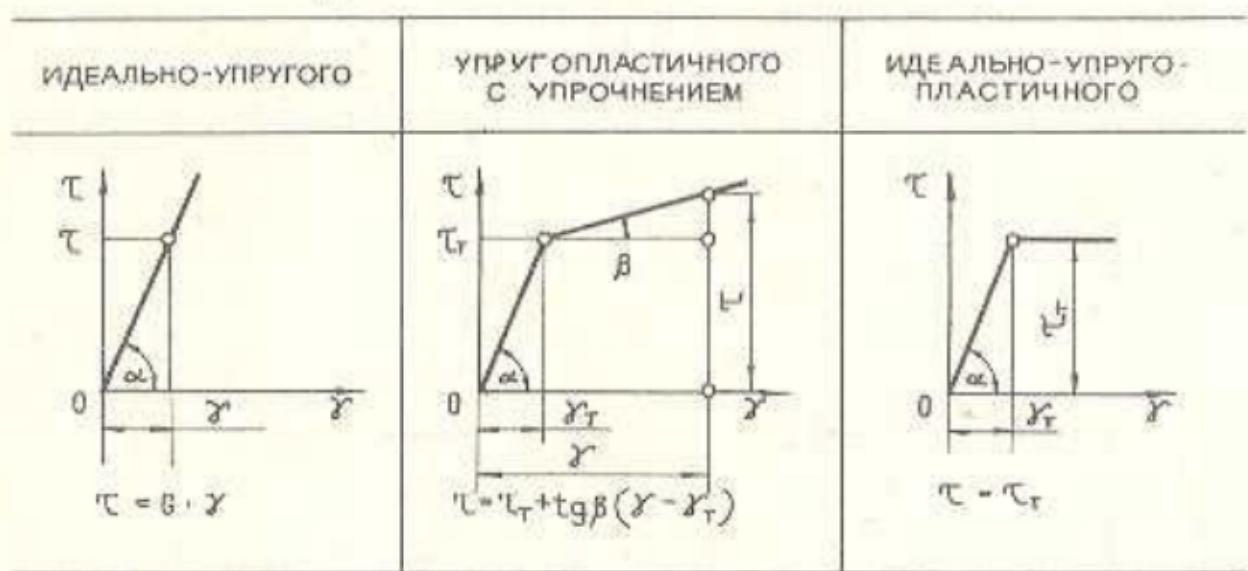
РЕЛАКСАЦИЯ

<b>ЭСКИЗ ОБРАЗЦОВ</b>  <p>КРУЧЕНИЕ ОБРАЗУЮЩАЯ</p>		 <p>СДВИГ ОБРАЗЕЦ</p>	
<b>МАТЕРИАЛ</b>	<b>СТАЛЬ</b>	<b>ДЕРЕВО</b>	<b>СТАЛЬ</b>
<b>ВИД РАЗРУШЕНИЯ</b>			
<b>ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ</b>	<b>СРЕЗ ПО ПОПЕРЕЧНОМУ СЕЧЕНИЮ; ОБРАЗУЮЩАЯ - ВИНТОВАЯ ЛИНИЯ</b>	<b>СКАЛЫВАНИЕ ВДОЛЬ ВОЛОКОН</b>	<b>СКАЛЫВАНИЕ УЧАСТКОВ СИД ВРУБКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСНОВНОЙ ЧАСТИ БРУСА</b>
<b>ВИД ДИАГРАММ</b>			
<b>РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>	$E = \frac{G}{2(1+\nu)}$	$\tau = \frac{M_k}{W_p}$	$\tau = \frac{Q}{A}$
	$\psi = \frac{M_k \cdot L}{G \cdot J_p}$	$\gamma = \frac{Q}{G \cdot A}$	

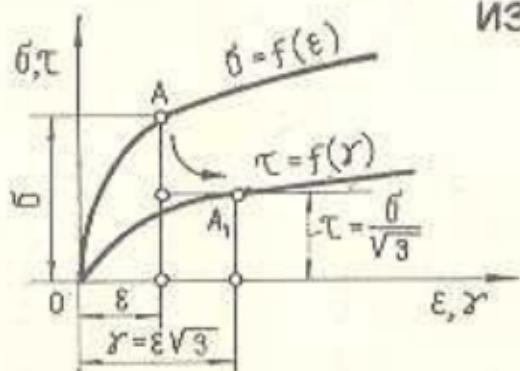
## СТАДИИ НАГРУЖЕНИЯ

① УПРУГАЯ	② УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ	③ ПЛАСТИЧЕСКАЯ
 <p> <math>\tau_{\max}</math>  <math>M_k = M_{\max}</math>  <math>M_{\max} = W_p \cdot \tau_{\max}</math>  <math>W_p = \frac{\pi d^3}{16}</math> </p>	 <p> <math>\tau_T</math>  <math>d_1</math>  <math>\tau'_T</math>  <math>M_T &lt; M_k &lt; M_{\text{ПР}}</math>  <math>M_k = (W_p^u + W_{\text{пл}}^*) \tau_T</math>  <math>W_p^u + W_{\text{пл}}^* = \frac{\pi d_1^3}{16} + \frac{\pi (d^3 - d_1^3)}{12}</math> </p>	 <p> <math>\tau_T</math>  <math>\tau'_T</math>  <math>M_k = M_{\text{ПР}}</math>  <math>M_{\text{ПР}} = W_{\text{пл}} \cdot \tau_T</math>  <math>W_{\text{пл}} = \frac{\pi d^3}{12}</math> </p>

## СХЕМАТИЗИРОВАННЫЕ ДИАГРАММЫ МАТЕРИАЛОВ



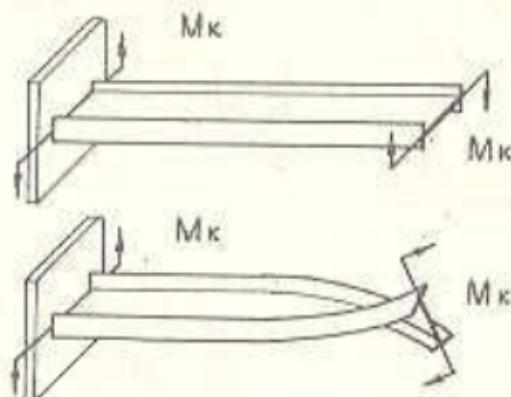
## ИЗ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ



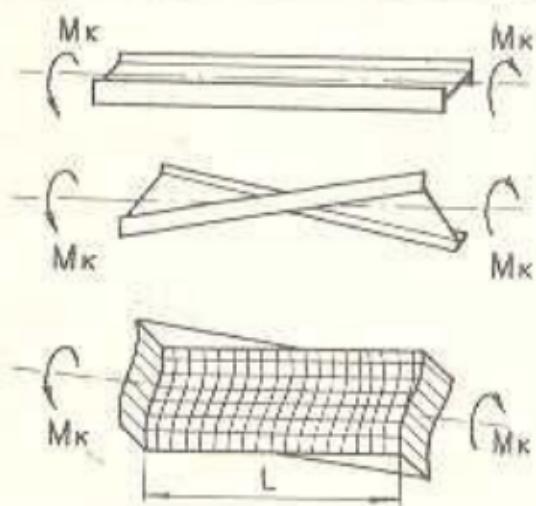
1.  $\sigma_L = E' \epsilon_L$
2.  $\mu = 0,5 \rightarrow \text{при } \sigma_L \geq \sigma_y$
3.  $G' = \frac{E'}{3}$ , где  
 $E'$  и  $E'$  — ПЕРЕМЕННЫЕ МОДУЛИ

# ДЕПЛАНАЦИЯ

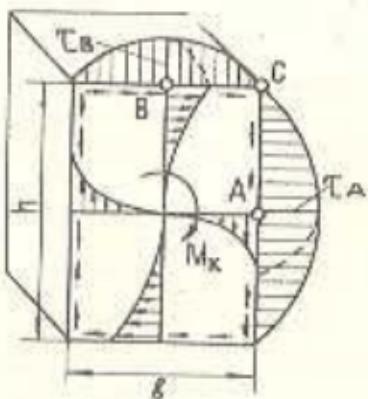
СТЕСНЕННОЕ КРУЧЕНИЕ (ИЗГИБНОЕ)



СВОБОДНОЕ КРУЧЕНИЕ (ЧИСТОЕ)



ИЗ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ



$$\tau_A = \tau_{\max} = \frac{M_k}{W_k}$$

$$\tau_A = \eta \tau_{\max}$$

$$\tau_C = 0$$

$$W_k = \alpha \delta^2 h$$

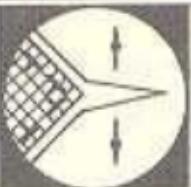
$$\bar{\tau}_k = \beta \delta^3 h$$

$$\varphi_k = \frac{M_k \cdot L}{G \cdot \bar{\tau}_k}$$

$$\alpha, \beta, \eta = f\left(\frac{h}{\delta}\right)$$



СХЕМА 4.4



## ПРОЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ

K<sub>Ic</sub>

ТРЕЩИНЫ



ГРИФФИТСА



РЕБИНДЕРА



КОНСТРУКЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ  
ХАРАКТЕРИЗУЮТ:

ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ  
ПО ИРВИНУ

K

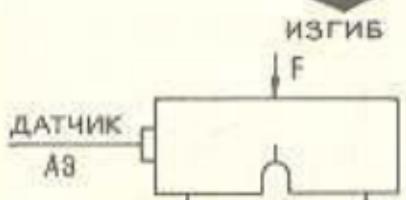
КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕН-  
СИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ  
ПРИ ОТРЫВЕ

K<sub>Ic</sub>

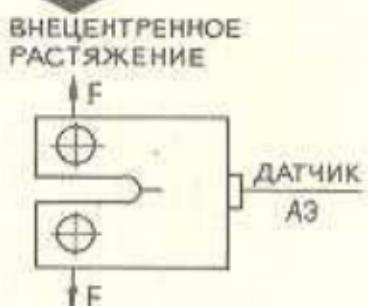
КРИТИЧЕСКИЙ КОЭФФИ-  
ЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ  
НАПРЯЖЕНИЙ, МАТЕРИ-  
АЛЬНАЯ КОНСТАНТА

ОБРАЗЦЫ для испытаний на K<sub>Ic</sub>



$$K_{Ic} = \sigma_1 \sqrt{\frac{F}{A_3}} \sqrt{\frac{C}{C_{kp}}}$$

C  
0  
A<sub>3</sub>  
 $C_{kp}$



Напряжение при  
 $C = C_{kp}$

СХЕМА 5.1

## ВЫПОЛННИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, изучившие:

- необходимые разделы теоретического курса и обобщающие схемы;
- цель, содержание, методику и технику выполнения работ;
- принципиальные схемы устройства и работы испытательных машин, установок и приборов;
- методику обработки экспериментальных данных.

2. Выполненную работу студент оформляет в журнале лабораторных работ, который составляется из бланков, приведенных в приложениях (1...6).

3. Отчет по проведенной работе оформляется студентом индивидуально с занесением в бланки лабораторных работ всех необходимых данных.

4. Отчет защищается каждым студентом по циклам лабораторных работ. Образцы тестовых карточек даны в приложении 7.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЦИКЛУ РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

#### 3.1. ИСПЫТАНИЕ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА РАСТЯЖЕНИЕ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Основные положения лабораторной работы обобщены схемой 3.1.

##### 3.1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить поведение пластичного материала при статическом растяжении вплоть до разрушения и определить основные механические характеристики прочности и пластичности;

- предел текучести  $\sigma_T$ ;
  - предел прочности  $\sigma_b$ ;
  - истинное сопротивление разрыву  $\sigma_g$ ;
  - относительное остаточное удлинение после разрыва  $\delta$ ;
  - относительное остаточное сужение после разрыва  $\psi$ .
2. Схематизировать условную диаграмму растяжения.

## НАГРУЖАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

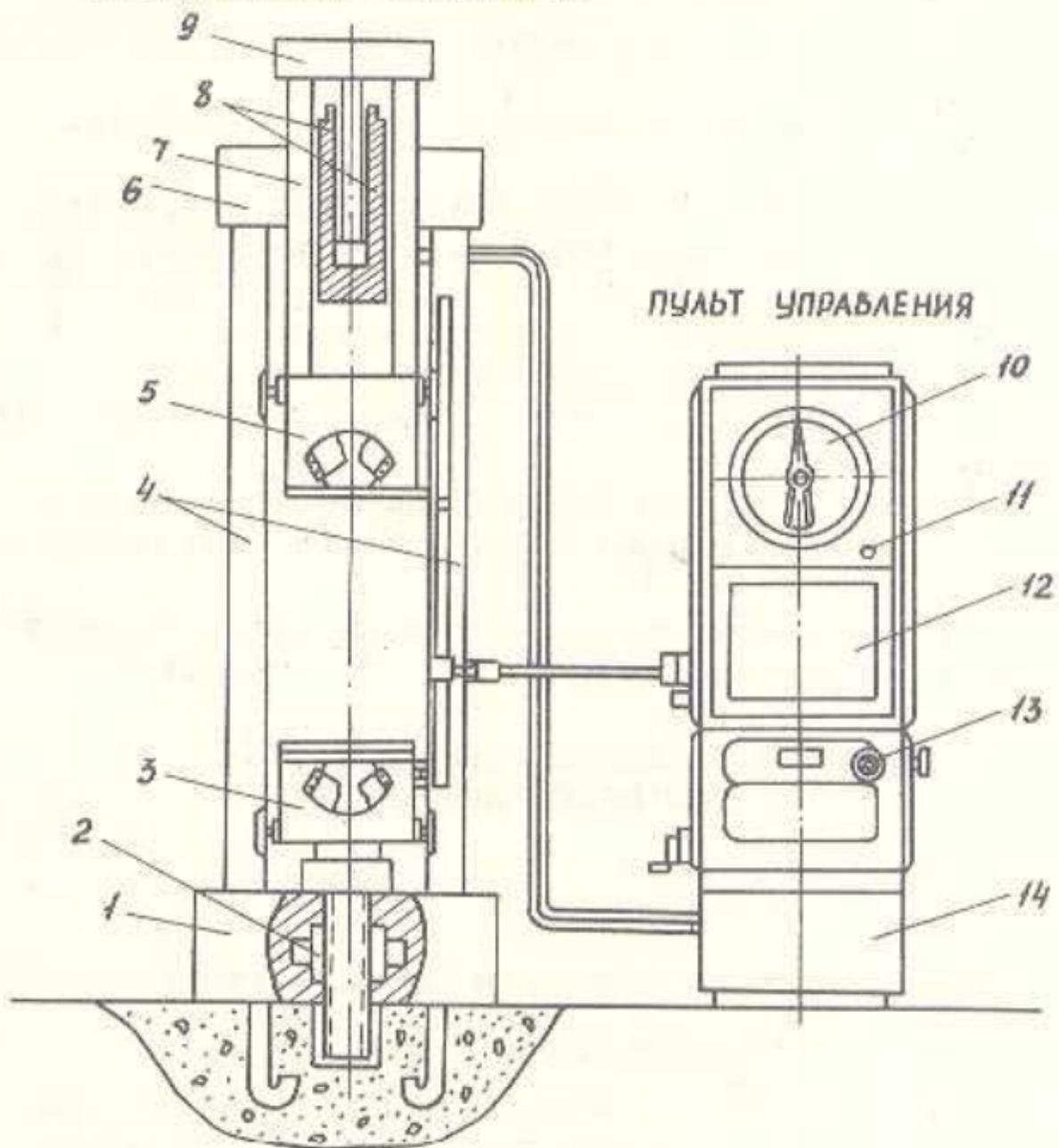


Рис.3.1. Схема испытательной машины Р-10:

1 - основание рамы; 2 - привод нижнего захвата;  
 3 - нижний захват (пассивный); 4 - колонны рамы;  
 5 - верхний захват (активный); 6 - траверса рамы;  
 7 - тяги верхнего захвата; 8 - гидравлический цилиндр; 9 - траверса верхнего захвата; 10 - силоизмеритель; 11 - переключатель; 12 - диаграммный аппарат; 13 - регулятор нагрузок; 14 - насосная установка

3. Изобразить общий вид образца до и после испытания и описать особенности разрушения.

4. Определить ориентировочно по полученным механическим характеристикам

а) марку стали;

б) допускаемое напряжение.

Испытания проводится при статическом растяжении до разрыва стандартного цилиндрического образца из углеродистой стали на универсальной испытательной машине с автоматической записью диаграммы растяжения. Принципиальная схема испытательной машины Р-10 приведена на рис.3.1.

### 3.1.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

1. Измерить диаметр образца  $d_o$ . Измерение производится штангенциркулем с точностью  $\pm 0,01$  см в трех местах рабочей части образца (в середине и до краям). По наименьшему из полученных размеров вычислить с округлением до  $0,005$  см<sup>2</sup> площадь поперечного сечения образца  $A_o$ .

2. Отметить на поверхности образца расчетную длину. Расчетная длина отмечается симметрично по отношению к рабочей длине образца с точностью  $\pm 0,01$  см и ограничивается неглубокими кернами. Для нормальных образцов расчетная длина  $\ell_o = 10d_o$ , для укороченных -  $\ell_o = 5d_o$ . Полученные измерения занести в таблицу (приложение I, табл. I.1).

3. Изобразить вид образца до испытания с нанесенными  $\ell_o$  и  $d_o$ .

4. Установить образец в захваты испытательной машины (рис.3.1). Проверить готовность к испытанию машины и диагностического аппарата.

5. Включить нагружающее устройство испытательной машины и, плавно нагружая образец, провести его испытание до разрушения. При испытании скорость перемещения подвижного захвата машины не должна превышать до предела текучести 2 мм/мин; за пределом текучести - 10 мм/мин.

6. Наблюдать в процессе испытания за поведением образца, автозаписью диаграммы растяжения и внимательно следить за показаниями силоизмерительного устройства машины. При проведении испытания необходимо зафиксировать и занести в таблицу (приложения I, табл. I.1):

а)  $F_T$  - нагрузку, соответствующую пределу текучести (стрел-

ка силоизмерителя на короткое время явно сокращается, а на автодиаграмме появляется площадка текучести);

б)  $F_B$  — максимальную нагрузку, соответствующую пределу прочности (временному сопротивлению). Максимальная нагрузка определяется по контрольной стрелке силоизмерителя;

в)  $F_K$  — нагрузку в момент разрыва, соответствующую истинному сопротивлению разрыву.

Величины нагрузок при испытании отсчитываются с точностью  $\pm 0,5$  наименьшего деления шкалы силоизмерителя.

7. Выключить после разрушения образца испытательную машину, извлечь из захватов обе половинки образца и снять автодиаграмму.

8. Произвести обмер разрушенного образца. Для этого плотно сложить обе части образца так, чтобы их оси образовали прямую линию, и измерить штангенциркулем длину расчетной части образца после разрыва  $l_1$ , а также минимальный диаметр в месте разрыва  $d_1$  (в шейке) в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Определить по среднему арифметическому из полученных значений площадь поперечного сечения в шейке  $A_1$  (скруглить до 0,5%). Полученные величины занести в таблицу (приложение I, табл. I.1).

### 3.1.3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЯ

I. Вычислить и занести в таблицу (приложение I, табл. I.2).

Характеристики прочности:

а) предел текучести  $\sigma_T = F_T / A_o$ , МПа;

б) предел прочности  $\sigma_B = F_B / A_o$ , МПа;

в) истинное сопротивление разрыву  $\sigma_S = F_K / A_o$ , МПа.

Характеристики пластичности:

а) относительное остаточное удлинение после разрыва

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

б) относительное остаточное сужение после разрыва

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%$$

Таблица 3.1

Механические характеристики некоторых сталей				
Марка стали	Предел текучести $\sigma_T(\sigma_{0.2})$ , МПа	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta, \%$	Относительное сужение $\psi, \%$
Ст 2	190...220	320...400	26...31	-
Ст 3	220...240	380...470	19...27	-
Ст 5	260...280	500...620	19...21	-
Ст 20	250	420...500	25	55
Ст 30	300	500	21	50
Ст 35	320	540	20	45
Ст 45	360	610...750	16	40
Ст 50	380	640...800	14	40
Ст 60	410	690...900	12	35
30 Г	320	550...700	20	45
60 Г	420	710	11	35
40 Х	800	1000	10	45

Таблица 3.2

$\sigma_T / \sigma_b$	0,45...0,55	0,55...0,7	0,7...0,9
$\eta_T$	1,2...1,5	1,4...1,8	1,7...2,2

2. Построить:

а) рабочую диаграмму растяжения (по типу автодиаграммы)

$F=f(\Delta l)$  с указанием всех характерных координат (приложение I, рис. I.1);

б) условную диаграмму растяжения  $\sigma=f(\varepsilon)$  и схематизировать ее без учета упрочнения стали (приложение I, рис. I.2).

3. Изобразить вид образца после испытания и описать особенности разрушения.

4. Определить:

а) примерную марку стали испытанного образца, сравнив результаты испытаний с механическими характеристиками сталей (табл.З.1);

б) допускаемое напряжение (ориентировочно)  $[\sigma] = \frac{\sigma_t}{n_t}$ , приняв в зависимости от отношений характеристик прочности испытываемой стали коэффициент запаса  $n_t$  по табл.З.2. Сравнить полученное допускаемое напряжение стали с приведенными в табл.З.3 ориентировочными величинами допускаемых напряжений.

3.1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как вычислить нормальные напряжения в поперечном сечении центрально 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? 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. 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 продольной упругости (модуль упругости первого рода), охарактеризуйте его и назовите, в каких единицах он измеряется;

д) наибольшую относительную упругую, остаточную и полную деформации к моменту разрыва образца;

е) области упругих деформаций, текучести материала, упрочнения и снижения сопротивляемости образца;

ж) разгрузку после нагружения образца выше предела текучести. Как найти при этом упругую и остаточную составляющие деформации?

8. Как определить относительное остаточное удлинение и суже-

Таблица 3.3

№ пп	Марка стали	Допускаемые напряжения, МПа	
		на растяжение	на сжатие
I	Ст 0 и Ст 2	140	140
2	Ст 3	160	160
3	Ст 3 в мостах	140	140
4	Сталь углеродистая конструкционная в машиностроении	60...250	60...250
5	Сталь легированная конструкционная в машиностроении	100...400 и выше	100...400 и выше

ние образца после разрыва? Какие это характеристики материала?

9. 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?

II. Какие характеристики по ГОСТу обозначаются  $\sigma_{0.02}$ ,  $\sigma_{0.2}$ . Как они определяются?

### 3.2. ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Основные положения лабораторной работы обобщены схемой 3.2.

#### 3.2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

I. Изучить поведение пластичных и хрупких, изотропных и анизотропных материалов при испытании на сжатие и определить их основные механические характеристики:

а) пределы пропорциональности и текучести пластичного материала  $\sigma_{pu}$  и  $\sigma_t$ ;

- б) предел прочности для хрупких материалов  $\sigma_b$ ;
- в) предел прочности для дерева вдоль волокон  $\sigma'_b$ ;
- г) условный предел прочности для дерева поперек волокон  $\sigma''_b$ .

2. Изобразить общий вид образцов до и после испытаний и описать особенности разрушения.

3. Вычертить вид диаграмм напряжений при сжатии.

4. Определить по полученным механическим характеристикам прочности:

- а) допускаемые напряжения (ориентировочно);
- б) коэффициент анизотропии для анизотропного материала.

Испытание проводится при статическом сжатии на универсальной испытательной машине (рис.3.1). Испытываются образцы из пластичного, хрупкого и анизотропного материалов. Образцы изготавливаются в виде цилиндров (сталь, чугун или дюраль) и кубиков (бетон, камень, дерево). Дерево (анизотропный материал) испытывают вдоль и поперек волокон.

### 3.2.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

1. Измерить с точностью  $\pm 0,01$  см и занести в таблицу (приложение 2, табл.2.1) следующие величины:

а) диаметр  $d$  и высоту  $h$  цилиндрических образцов;

б) стороны  $a$ ; каждое измерение берется как среднее из трех (по краям и в середине) кубических образцов.

2. Вычислить площадки поперечных сечений образцов  $A_o$ ,  $\text{см}^2$  и занести в таблицу (приложение 2, табл.2.1).

3. Изобразить в таблице (приложение 2, табл.2.2) вид образцов до испытаний.

4. Установить каждый образец строго по центру на нижнюю плиту испытательной машины. Перемещением захвата машины образец довести до соприкосновения с верхней плитой.

5. Включить машину и, плавно нагружая образец, провести его испытания. Скорость деформации не должна превышать (2...3)  $\text{мм}/\text{мин}$ .

6. Следить в процессе испытания за поведением образца. Зафиксировать по силоизмерителю машины и занести в таблицу (приложение 2, табл.2.1):

а)  $F_{pu}$  — нагрузку, соответствующую пределу пропорциональности и  $F_T$  — пределу текучести (при наличии диаграммы

сжатия) для пластичных материалов;

б)  $F_b$  - нагрузку, соответствующую пределу прочности (разрушающую нагрузку) для хрупких материалов;

в)  $F_v$  - нагрузку, соответствующую пределу прочности при испытании в разных направлениях анизотропных материалов.

Испытание образцов из дерева вдоль волокон проводится до разрушения, которому соответствует образование поперечных складок и обмятие торцов. Испытание образцов из дерева поперек волокон заканчивается при значительном росте деформаций без увеличения нагрузки. Условно считают, что разрушающей является нагрузка, при которой образец сжимается на  $1/3$  своей начальной высоты.

### 3.2.3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ

1. Вычислить и занести в таблицу (приложение 2, табл.2.2) характеристики прочности:

а)  $\sigma_{pl} = F_{pl}/A_o$  - предел пропорциональности и  $\sigma_T = F_T/A_o$ , МПа - предел текучести для пластичных материалов;

б)  $\sigma_b = F_b/A_o$ , МПа - предел прочности для хрупких материалов;

в)  $\sigma_v = F_v/A_o$ , МПа - предел прочности (вдоль и поперек волокон) для анизотропных материалов.

2. Изобразить в таблице (приложение 2, табл.2.2) вид образцов после испытаний и описать особенности разрушения.

3. Вычертить вид диаграмм напряжений  $\sigma = f(\varepsilon)$  при сжатии (приложение 2, табл.2.2), на которых показать основные механические характеристики.

4. Определить по полученным характеристикам прочности:

а) допускаемые напряжения, приняв в зависимости от материала ориентировочно коэффициент запаса на сжатие  $n_b$  по табл. 3.4.

Сравнить полученные допускаемые напряжения материалов с их ориентировочными величинами (табл.3.5.).

При определении допускаемого напряжения для стали по  $\sigma_T$  взять  $n_T$  из табл. 3.2 и сравнить с данными табл. 3.3;

б) коэффициент анизотропии  $K = \sigma_b/\sigma_v''$ , представляющий отношение предела прочности вдоль волокон  $\sigma_b'$  к пределу прочности поперек волокон  $\sigma_v''$ .

Таблица 3.4

Материал	Высокопрочные в низкоотпущенные стали	Чугун	Бетон	Камень Кирпич	Дерево		Доралюминий	
					вдоль волокон	поперек волокон		Текстолит
<i>n<sub>g</sub></i>	2,4...2,6	4...7	2..3,5	8..12	3,5..4	4,5..6	3,5..5,5	1,7..2,

Таблица 3.5

№ пп	Материал	Допускаемые напряжения, МПа	
		на растяжение	на сжатие
I	Серый чугун в отливках	20...55	70...200
2	Доралюминий	80...150	80...150
3	Сосна вдоль волокон	7...10	10...12
4	Сосна поперек волокон	-	1,5...2
5	Дуб вдоль волокон	9...13	13...15
6	Дуб поперек волокон	-	2...3,5
7	Бетон	0,1...0,7	1...9
8	Кирпичная кладка	до 0,2	0,6...2,5
9	Каменная кладка	до 0,3	0,4...4,0
10	Текстолит	30...40	50...90
II	Гетинакс	50...70	50...70

### 3.2.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как вычислить нормальные напряжения в поперечном сечении центрально скатого 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 испытаний на сжатие? Каков их вид после испытания и от чего зависят особенности разрушения?
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 допускаемые 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?

### 3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ МАТЕРИАЛА — МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

#### 3.3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определить упругие постоянные малоуглеродистой стали:
  - а) модуль продольной упругости (модуль Юнга)  $E$  ;
  - б) коэффициент Пуассона  $\mu$  .
2. Проверить экспериментально закон Гука при растяжении и наличие следов сдвига — линий Людерса—Чернова — на поверхности образца в области текучести материала.

Испытание проводится при статическом растяжении плоского шлифованного образца из малоуглеродистой стали на универсальной

испытательной машине с измерением упругих деформаций рычажными тензометрами ТР-1. Схема тензометра дана на рис.3.2.

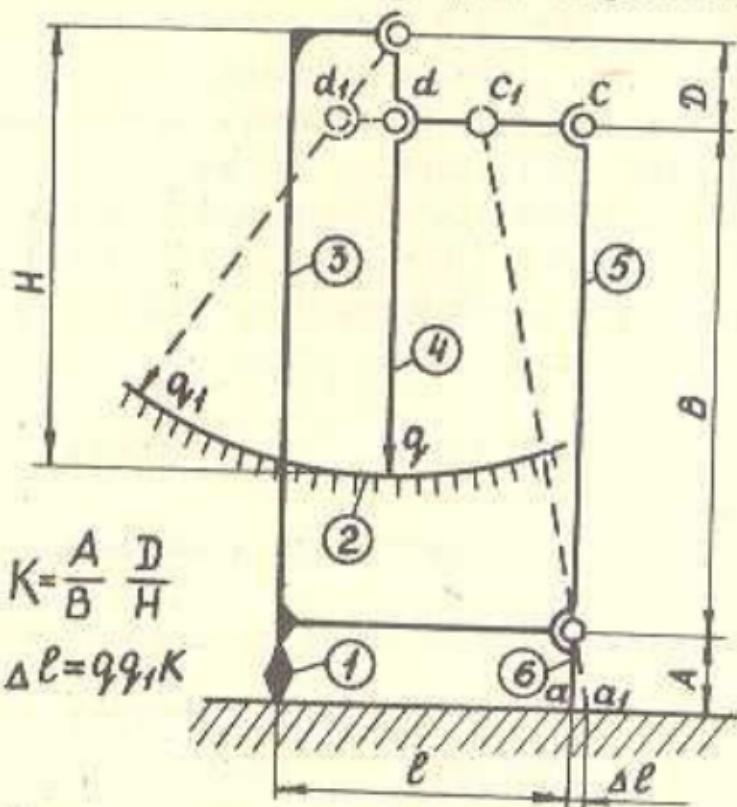


Рис.3.2. Схема тензометра: 1- неподвижная опора; 2- шкала; 3- кордус; 4- стрелка; 5- рычаг; 6- подвижная опора

### 3.3.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы рычажного тензометра ТР-1 и научиться правильно снимать его показания.

2. Занести в таблицу (приложение 3, табл.3.1) следующие данные:

а) размеры образца (ширину  $a$ , см; толщину  $b$ , см; площадь поперечного сечения  $A_o$ , см $^2$ );

б) характеристики тензометра ТР-1 (базу  $\ell_o = 20$  мм и коэффициент увеличения  $K = 1000$ ).

3. Определить наибольшую нагрузку, которую можно приложить к образцу, не вызывая напряжений, превышающих предел пропорциональности:  $F_{max} < \sigma_{pc} A_o$ .

Для малоуглеродистой стали ориентировочно  $\sigma_{pc} = 200$  МПа.

4. Проверить готовность к испытанию машин и тензометров. Закрепить на образце четыре тензометра по два вдоль и поперек его длины для измерения продольных и поперечных деформаций

(приложение 3, рис.3.1 и 3.2).

5. Установить образец в захваты разрывной машины.

6. Дать небольшую предварительную нагрузку (3...4) кН с тем, чтобы напряжения не превышали (15...20) МПа. При этой нагрузке произвести первые по тензометрам отсчеты и заполнить таблицу (приложение 3, табл.3.2).

7. Нагружать плавно образец до  $\sigma_{пц}$ . Через равные ступени нагрузки  $\Delta F = (4...6)$  кН приращение  $\sigma = (20...30)$  МПа. снимать отсчеты по тензометрам, результаты заносить в табл.3.2.

8. Разгрузить плавно образец до начальной нагрузки и сделать контрольные отсчеты по тензометрам.

9. Нагрузить образец повторно до ориентировочного значения предела текучести  $\sigma_t \approx 240$  МПа и, вновь разгрузив, сделать отсчеты по тензометрам. Следить за появлением линий Людерса-Чернова.

### 3.3.3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЯ

1. Вычислить по данным испытания и занести в таблицу (приложение 3, табл.3.2) следующие значения:

а) абсолютную разность  $\Delta A$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta C$  и  $\Delta D$  двух последовательных отсчетов для тензометров А, В, С, Д;

б) среднюю разность отсчетов для продольной 0,5 ( $\Delta A + \Delta B$ ) и поперечной 0,5 ( $\Delta C + \Delta D$ ) деформаций;

в) средние арифметические величины  $\Delta P_{ср}$  и  $\Delta P'_{ср}$  по данным первоначальных одинаковых отсчетов.

2. Определить по данным вычислений и занести в таблицу (приложение 3, табл.3.3) следующие характеристики:

а) относительную продольную и поперечную деформации

$$\varepsilon = \Delta P_{ср} / k \cdot l_0 ; \quad \varepsilon' = \Delta P'_{ср} / k \cdot l_0 ;$$

б) модуль продольной упругости (модуль Юнга)

$$E = \Delta F / A_0 \varepsilon , \text{ МПа} ;$$

в) коэффициент Пуассона  $\mu = \varepsilon' / \varepsilon$ .

3. Построить по данным испытаний упругий участок диаграммы растяжения и оценить справедливость закона Гука.

4. Описать и объяснить деформирование образца в области текучести материала. Проверить наличие остаточных деформаций.

5. Сравнить полученные данные упругих постоянных  $E$  и  $\mu$  с табличными величинами.

### 3.3.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется пределом пропорциональности?
2. Какие линейные деформации называются абсолютными, какие – относительными?
3. Как формулируется закон Гука?
4. Что называется модулем продольной упругости и какие свойства материала он характеризует?
5. Что называется коэффициентом Пуассона и какие свойства материала он характеризует?
6. Цель и порядок проведения лабораторной работы.
7. Назначение, устройство и принцип работы рычажного тензометра.
8. Сколько тензометров и для измерения каких деформаций устанавливается на образце в данной работе?
9. Как по данным эксперимента проверить закон Гука?
10. Как экспериментально определить модуль продольной упругости (модуль Юнга)?
- II. Как экспериментально определить коэффициент Пуассона?
12. С каким процессом можно связать наличие на поверхности образца линий Людерса–Чернова?

### 3.4. ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ ЦИКЛА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ НА РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

Основные положения цикла обобщены схемами 3.3 и 3.4.

1. Покажите схематизированные диаграммы  $\sigma = f(\varepsilon)$  для идеально упругого, идеально упругопластичного и упругопластичного с линейным упрочнением материалов.
2. Сравните диаграммы растяжения различных сталей: малоуглеродистой; малоуглеродистой, подвергнутой наклепу, легированной и термически обработанной (закаленной и низкоотпущеной). Какая характеристика прочности является основной 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 температура в интервале (0...800)°С на механические характеристики углеродистой стали, такие, как  $E$ ,  $M$ ,  $\sigma_{\text{пн}}$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$  и  $\delta$ ?

8. Как влияет скорость нагружения на механические характеристики материала? Покажите на диаграмме растяжения модули упругости - статический, при ударе и при колебаниях.

9. Какова физическая природа наклена, пределов текучести и прочности?

10. Какова разница между физическим и техническим пределами упругости?

11. Каков механизм процесса разрушения чугуна, бетона?

12. Что называется пластическим (вязким) и хрупким разрушением? Каковы особенности перемещения трещин и каков микроскопический характер разрушения в местах излома?

13. Как влияют повторные сжимающие нагрузки на диаграмму скатия бетона?

14. Дислокационный механизм предела текучести малоуглеродистой стали.

15. Что называется ползучестью материала и релаксацией напряжений? Какие стадии имеют кривые ползучести и релаксации? Как изменяется скорость ползучести и релаксации на различных стадиях?

16. Какие факторы влияют на величину ползучести и релаксации?

17. Назовите механическую характеристику, определяемую при испытании на усталость. В каких координатах строится кривая усталости и с какой целью?

18. Перечислите факторы, влияющие на величину предела выносливости.

Примечание. При защите цикла лабораторных работ необходимо знать ответы на контрольные вопросы 3.1.4, 3.2.4 и 3.3.4.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Лисаренок Г.С. и др. Сопротивление материалов.-Киев: Вища школа, 1979 (и другие издания).

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов.-М.:Наука, 1979 (и другие издания). Гл. I: § 13-19.

3. Смирнов А.Ф. Сопротивление материалов.-М.:Высшая школа, 1975 (и предыдущие издания). Гл.2: §7, 10-18; § 20 (для студ. спец.ПГС).

4. Афанасьев А.Н., Маркин В.А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов.-М.:Наука, 1975. Гл.1: §1-3,5.

5. Беляев Н.М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов.-М.: Гостехиздат, 1956. Введение, § 1: Гл.1: § 3,4,6,II,18; гл.2: § 22,23,25; гл.3: § 33,34.

6. Писаренко Г.С. и др. Справочник по сопротивлению материалов.-Киев: Наукова думка, 1975. Гл.4: § 25,26,28.

#### 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЦИКЛУ КРУЧЕНИЕ И СДВИГ

##### 4.1. ИСПЫТАНИЯ СТАЛЬНОГО И ЧУГУННОГО ОБРАЗЦОВ НА КРУЧЕНИЕ

Основные положения лабораторной работы обобщены схемой 4.1.

###### 4.1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить поведение пластичного и хрупкого материалов при кручении и определить основные механические характеристики:

- а) предел пропорциональности при кручении  $T_{пц}$ ;
- б) предел прочности при кручении  $T_b$ ;
- в) относительный угол закручивания  $\Theta$ .

2. Изобразить вид излома испытанных образцов и описать особенности разрушения.

3. Схематизировать диаграммы напряжений при кручении.

Испытание проводится при статическом кручении до разрушения стандартных образцов круглого поперечного сечения на испытательной машине КМ-50-1 с автоматической записью диаграмм кручения (рис.4.1). Материал образцов - сталь и чугун.

###### 4.1.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

1. Измерить с точностью  $\pm 0,01$  см и занести в таблицу 4.1 (приложение 4, табл.4.1) следующие величины:

а) диаметр образцов  $d$ ;

б) расчетную длину  $l$ , которая наносится на поверхность цилиндрической части образцов в виде образующей симметрично относительно рабочей длины. Соотношение этих величин обычно  $l=10d$  или  $l=5d$ .

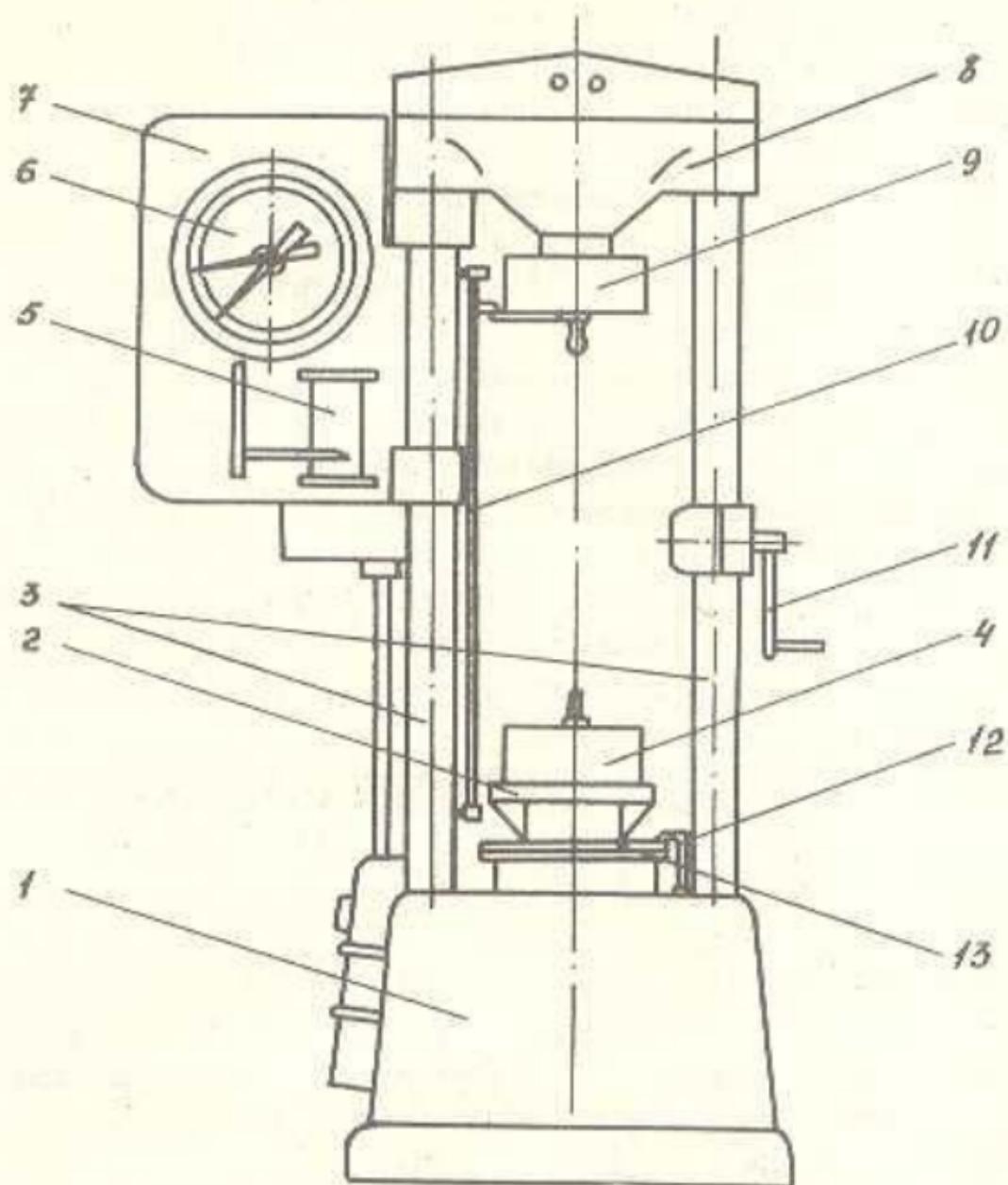


Рис.4.1. Схема испытательной машины КМ-50-1:

1 - корпус привода (внутри электродвигатель);  
 2 - маховик нижнего захвата; 3 - цилиндрические колонны; 4 - нижний захват (активный); 5 - диаграммный аппарат; 6 - моментоизмеритель; 7 - корпус силосизмерительного устройства; 8 - корпус механизма нагружения; 9 - верхний захват; 10 - корректирующее приспособление углов закручивания; 11 - рукоятка ручного привода; 12 - стрелка шкалы углов закручивания; 13 - шкала углов закручивания

2. Вычислить и занести в таблицу (приложение 4, табл.4.1) величины полярных моментов сопротивления  $W_p = \frac{\pi d^3}{16}$ , см<sup>3</sup>.

3. Зарисовать в таблице (приложение 4, табл.4.2) вид образцов до испытания.

4. Установить образец в захваты испытательной машины. Проверить готовность к испытанию машины и диаграммного аппарата.

5. Включить нагружающее устройство испытательной машины и, плавно нагружая образец, провести его испытание до разрушения.

6. Наблюдать в процессе испытания за доведением образца, автозапись диаграммы кручения и следить за показаниями стрелки шкалы моментаизмерителя (показания даны в кГ·м). При проведении испытания зафиксировать и занести в таблицу (приложение 4, табл.4.3) следующие значения:

а)  $M_{pc}$  - крутящий момент, соответствующий пределу пропорциональности (только для стали при наличии диаграммы кручения);

б)  $M_b$  - наибольший крутящий момент, соответствующий пределу прочности;

в)  $n$  - число оборотов нижнего захвата, которое берется со счетчика оборотов.

#### 4.1.3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЯ

1. По полученным данным:

а) построить диаграммы кручения  $M_K = f(\varphi)$  (приложение 4, рис.4.1), где  $\varphi$  выразить в радианах,  $M_K$  - в кГ·см (на автодиаграмме  $\varphi$  приведены в градусах). Масштаб диаграммы  $K = M_b/y_b$ , где  $M_b$  - наибольший крутящий момент;  $y_b$  - наибольшая ордината на диаграмме кручения;

б) определить и занести в таблицу (приложение 4, табл. 4.3) величину крутящего момента, соответствующего пределу пропорциональности:  $M_{pc} = Ky_p$ , где  $y_p$  - ордината на автодиаграмме, соответствующая  $M_{pc}$ ;

в) вычислить и занести в таблицу (приложение 4, табл.4.3) полный угол закручивания  $\varphi = \varphi_{max} 2\pi / 360$ , или  $\varphi = 2\pi n$ , где  $n$  - число оборотов.

2. Вычислить и занести в таблицу (приложение 4, табл. 4.3) следующие значения.

характеристики прочности:

а) предел пропорциональности при кручении

$$\tau_{pl} = M_{pl}/W_P, \text{ МПа};$$

б) предел прочности при кручении

$$\tau_b = M_b/W_P, \text{ МПа.}$$

Характеристику пластичности:

относительный угол закручивания  $\Theta = \varphi/\ell, \text{ рад}/\text{м.}$

3. Изобразить в таблице (приложение 4, табл.4.2) вид излома образцов после испытания и описать особенности разрушения стали и чугуна.

4. Вычертить вид диаграммы напряжений при кручении  $\tau = f(\gamma)$  и схематизировать их (приложение 4, рис.4.2): для стали – без учета упрочнения, для чугуна – с учетом деструкции от  $\tau = 0,7\tau_b$ .

Принять:

касательные напряжения  $\tau$ , МПа;

относительный угол сдвига  $\gamma = \varphi d/2\ell, \text{ рад.}$

Примечание. Предел текучести при кручении  $\tau_t$  определяется как условная величина, при которой остаточный угол сдвига равен 0,003 радиана; для стали  $\tau_t \approx (0,55 \dots 0,6) \tau_b$ .

#### 4.1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Покажите схему чистого сдвига. При каких условиях нагружения это можно получить? Что называется абсолютным и относительным сдвигом?

2. Напишите и сформулируйте закон Гука при сдвиге. Каков физический смысл модуля упругости при сдвиге (модуля упругости второго рода) и чему он равен для стали?

3. В условиях какого напряженного состояния работают элементы бруса при кручении?

4. Как определить напряжения в любой точке поперечного сечения при кручении бруса? Охарактеризуйте закон их изменения.

5. Напишите выражения полярного момента инерции и момента сопротивления для брусьев круглого поперечного сечения (сплошного и кольцевого).

6. Какие образцы применяются при испытании на кручение?  
Цель испытания на кручение.

7. Изобразите диаграмму кручения  $M_k = f(\varphi)$  для пластичного

материала, определите и охарактеризуйте пределы пропорциональности, текучести и прочности. Объясните, почему на диаграмме почти незаметна площадка текучести.

8. Изобразите и охарактеризуйте диаграммы кручения для хрупкого (чугуна) и анизотропного (дерева) материалов.

9. Чему равны главные напряжения при кручении и под каким углом к оси бруса они действуют?

10. Как формулируется закон парности касательных напряжений при сдвиге?

11. Опишите и объясните характер разрушения стали, чугуна и дерева при кручении.

12. Какой характеристикой оцениваются пластические свойства материала при кручении? Напишите выражение полного и относительного углов закручивания. В каких единицах они измеряются?

13. Каким соотношением определяется связь между относительным углом сдвига и относительным углом закручивания?

14. Что называется жесткостью при кручении? Как от нее зависит угол закручивания при кручении?

15. Напишите условие прочности и жесткости при кручении. Как определить  $[T]$  и от чего зависит  $[\theta]$ ?

16. Как определить диаметр бруса круглого сечения, если известны  $M_K$  и  $[T]$ ?

#### 4.2. ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА СРЕЗ

Основные положения лабораторной работы обобщены схемой 4.2.

##### 4.2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определить предел прочности на срез углеродистой стали.

2. Сравнить предел прочности на срез с пределом прочности при растяжении углеродистой стали.

Испытание проводится на универсальной испытательной машине с использованием специального приспособления, осуществляющего перерезывание цилиндрического образца.

##### 4.2.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

1. Измерить диаметр образца  $d$ , см, вычислить площадь поперечного сечения  $A$ ,  $\text{см}^2$ , и занести полученные данные в таблицу (приложение 5, табл. 5.1).

2. Закрепить в захватах испытательной машины специальное

приспособление, при помощи которого осуществляется перерывание (рис.4.2).

3. Вставить образец в приспособление.
4. Включить машину. По шкале силоизмерителя наблюдать за возрастанием нагрузки. Разрушающей является наибольшая нагрузка  $F_b$ , полученная при испытании.
5. Занести в таблицу (приложение 5, табл.5.1) величину разрушающей нагрузки.

#### 4.2.3. СБРАСЫВАНИЕ ДАННЫХ ИСПЫТАНИЯ

1. Вычислить предел прочности на срез  $\tau_b$  и занести полученный результат в таблицу (приложение 5, табл.5.1);

$$\tau_b = F_b / A_{cr}, \text{ МПа, где площадь среза } A_{cr} = 2A.$$

2. Сравнить предел прочности на срез с пределом прочности при растяжении.

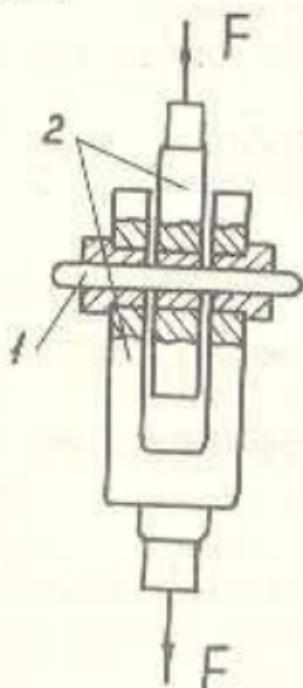


Рис.4.2. Схема приспособления для испытания на срез:  
1 - образец; 2 - проушина

#### 4.2.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется деформацией сдвига?
2. Привести примеры элементов конструкций, работающих на сдвиг.
3. Какое напряженное состояние называется чистым сдвигом?
4. Как вычислить напряжения в подвергнутом сечении при сдвиге и каков закон их распределения?

5. Какая механическая характеристика определяется при испытании на срез, как определяется допускаемое напряжение и записывается условие прочности?

6. По скольким плоскостям происходит сдвиг при испытании стального образца? Каков характер разрушения при сдвиге?

7. Как формулируется закон парности касательных напряжений при сдвиге?

8. Что такое абсолютный и относительный сдвиг?

9. Сформулируйте закон Гука при чистом сдвиге.

10. Что называется жесткостью при сдвиге?

11. Что характеризует модуль упругости при сдвиге (модуль упругости второго рода) и в каких единицах измеряется?

12. Чему равны главные напряжения при сдвиге и под каким углом к оси бруса они действуют?

13. На что расходуется вся потенциальная энергия деформации в единице объема материала при чистом сдвиге?

14. Как из условия прочности на срез подбирается диаметр болта или заклепки?

#### 4.3. ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ ЦИКЛА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ НА КРУЧЕНИЕ И СДВИГ

Основные положения цикла обобщены схемами 4.3 и 4.4.

1. Какая существует зависимость между  $G$ ,  $E$  и  $\mu$ ; как она используется в эксперименте?

2. Почему гипотезы, положенные в основу расчета круглого сечения при кручении, не пригодны для стержней некруглого сечения?

3. Что такое депланация, чистое и стесненное кручение?

4. По каким формулам определяются моменты инерции и моменты сопротивления при кручении прямоугольного сечения со сторонами  $h$  и  $b$  ( $h > b$ )?

5. Как определяется угол закручивания при кручении прямоугольного сечения.

6. Как определяются касательные напряжения при кручении прямоугольных сечений в срединных точках каждой стороны и чему они равны около внешних углов?

7. Чем объяснить, что брус кольцевого сечения экономичнее круглого сплошного?

8. Покажите видоизменение эпюры касательных напряжений при

кручении круглого стержня в процессе непрерывного нарастания крутящего момента (до предельного крутящего момента) для идеально упругопластичного материала.

9. Как определить предельный крутящий момент при кручении в случае расчета за пределами упругости?

10. Покажите схематизированные диаграммы  $T=f(\vartheta)$  для идеально упругого, идеального упругопластичного и упругопластичного с линейным упрочнением материалов.

II. Основные типы машин при испытании на кручение и их принцип работы.

Примечание. При защите цикла лабораторных работ необходимо знать ответы на контрольные вопросы 4.1.4 и 4.2.4.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко Г.С. и др. Сопротивление материалов.-Киев: Вища школа, 1979 (и другие издания).Гл. XI:§2-4.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов.-М.:Наука, 1979 (и другие издания).Гл. П:§20-22.

3. Смирнов А.Ф. Сопротивление материалов.-М.:Высшая школа, 1975 (и предыдущие издания).Гл. ГУ:§34-37; гл. УШ:§51, 54, 56, 57 (для спец. ПС).

4. Афанасьев А.Н., Маркин В.А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов.-М.:Наука, 1975. Гл. 1:§4; гл. 2:§68.

5. Беляев Н.М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов.-М.:Гостехиздат, 1956.Гл. З:§43, 44; гл. I:§15, 17; гл. Ш:§46, 45 (диаграммы  $M_k - \varphi$  и характер разрушения).

6. Писаренко Г.С. и др. Справочник по сопротивлению материалов.-Киев:Наукова думка, 1975.Гл. 8:§43-45; гл. 9.

## 5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЦИКЛУ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

### 5.1. ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ОТРЫВЕ – КРИТЕРИЙ $K_{Ic}$

Основные положения лабораторной работы обобщены схемой 5.1.

#### 5.1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить поведение конструкционного материала в виде образца стали с надрезом и наведенной на его дне острой усталостной трещиной в условиях внеклентренного растяжения или изгиба для определения вязкости разрушения  $K_{Ic}$ .

2. Изобразить общий вид образца до испытания и описать особенности его разрушения после испытания.

3. Построить график зависимости длины трещины от напряжения.

Испытание образца проводится на универсальной испытательной машине Р-1С (рис. 3.1) при внеклентренном растяжении или изгибе. Разрушение определять методом акустической эмиссии (АЭ), подсоединив к образцу датчик прибора, регистрирующий сигналы АЭ при возрастании нагрузки.

#### 5.1.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Студент получает образец с нанесенной усталостной трещиной.

1. Изобразить общий вид образца до испытания. Измерить с точностью до  $\pm 0,01$  см толщину образца  $t$  и занести в таблицу (приложение 6, табл. 6.1).

2. Закрепить в захватах испытательной машины шарнирные приспособления и установить образец для проведения испытания на внеклентренное растяжение (при испытании на изгиб образец нагружают с помощью призм).

3. Подключить к образцу датчик прибора АЭ с автоматической записью сигналов АЭ в зависимости от нагрузки  $F$ . Включить машину и, плавно нагружая со скоростью (2...3)  $\text{мм}/\text{мин}^*$ , следить за начерчиванием графика  $AЭ = f(F)$ . Как только амплитуда сигналов АЭ возрастает, остановить нагружение, так как это означает, что трещина из медленного режима роста перешла в быстрый. Вели-

\* Скорость увеличения коэффициента интенсивности напряжений не должна превосходить  $3 \text{ кН}/\text{м}^{3/2}$ , или время достижения критической нагрузки должно быть не менее 0,5 мин.

чину критической нагрузки  $F_1$  занести в таблицу (приложение 6, табл.6.1).

5. Освободить образец от нагружающего устройства и перевести его в печь с температурой  $\sim 300^{\circ}\text{C}$ , выдержать после прогрева (5...8) мин (для окраски образовавшейся трещины в синий цвет побежалости).

6. Установить образец повторно в нагружающее устройство и довести до полного разрушения.

### 5.1.3. СБРАВОТКА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЯ

1. Измерить на изломе образца (приложение 6, рис.6.1) с помощью инструментального микроскопа или луны Бринелля в пяти точках по ширине образца длину скрашенной части трещины. Взять среднее арифметическое значение длины, которое соответствует (или несколько больше)  $C_{kp}$ -критической длине трещины. Все данные занести в таблицу (приложение 6, табл.6.1).

2. Вычислить и занести в таблицу (приложение 6, табл.6.1) напряжение, соответствующее моменту разгружения  $\sigma_1 = F_1/C_{kp} t_{kp}/\text{мм}^2$  или  $\text{МН}/\text{м}^2$ .

3. Определить вязкость разрушения при отрыве

$$K_{Ic} = \sigma_1 \sqrt{\pi C_{kp}}, \text{ МН}/\text{м}^{3/2}.$$

4. Построить график зависимости длины трещины от напряжения (приложение 6, рис.6.2) по данным АЭ.

5. Описать особенности разрушения образца после испытания, обращая внимание на то, какое напряженное состояние соблюдается: плоское напряженное или деформированное.

### 5.1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид имеют трещины Гриффитса и Робиндера?

2. Что называется конструкционной прочностью? Какой константой она характеризуется?

3. Что называется вязкостью разрушения?

4. Как определяется критический коэффициент вязкости разрушения?

5. Что означают коэффициенты  $K_{Ic}, K_{Ic}, K_{IIc}$ ?

6. Виды образцов для испытания на  $K_{Ic}$ .

7. Как экспериментально определить  $K_{Ic}$ , используя метод акустической эмиссии?
8. Особенности разрушения образца после испытания на  $K_{Ic}$
9. Изобразите график зависимости длины трещины от напряжения.
10. Как рассчитать теоретическую прочность и какова она для стали?
- II. Как зависят предела выносливости стали и композита от пределов текучести?

## ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Приложение I

Цель работы:

изучение поведения пластичного материала при статическом растяжении и определение основных механических и расчетных характеристик прочности и пластичности. Испытание проводится путем растяжения до разрыва стандартного цилиндрического образца на универсальной машине с автоматической записью диаграммы растяжения.

вид образца

до испытания

после испытания

Таблица I.1

Материал образца	Размеры и площади сечений образца				Нагрузка, кН соответствующая
	Диаметр $d_0$ , см	Площадь поперечно-го сечения $A_0$ , см <sup>2</sup>	Расчетная длина $\ell_0$ , см	Наименьший диаметр шейки $d_1$ , см	
				Площадь сечения в шейке $A_1$ , см <sup>2</sup>	
				Расчетная длина $\ell_1$ , см	
					Предел текучести, $F_T$
					Предел прочности, $F_B$
					Разрыв в шейке, $F_K$

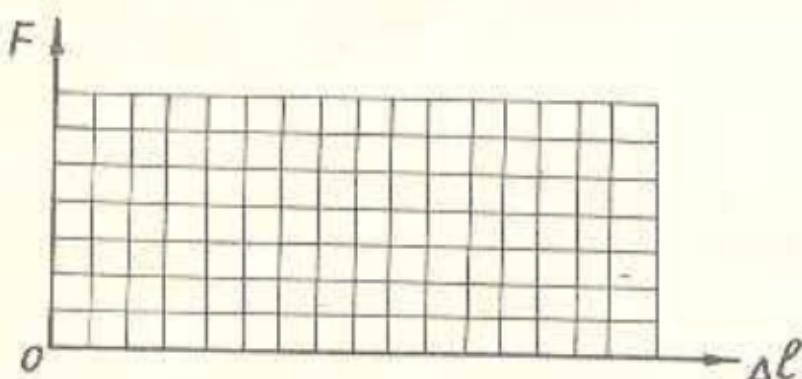


Рис. I.1. Диаграмма растяжения

Таблица I.2

Механические характеристики	прочности	Предел текучести	$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}$	MPa	
		Предел прочности	$\sigma_B = \frac{F_B}{A_0}$	MPa	
		Истинное сопротивление разрыву	$\sigma_S = \frac{F_K}{A_1}$	MPa	
	пластичности	Относительное остаточное удлинение	$\delta = \frac{\ell_1 - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100\%$	%	
		Относительное остаточное сужение	$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100$	%	

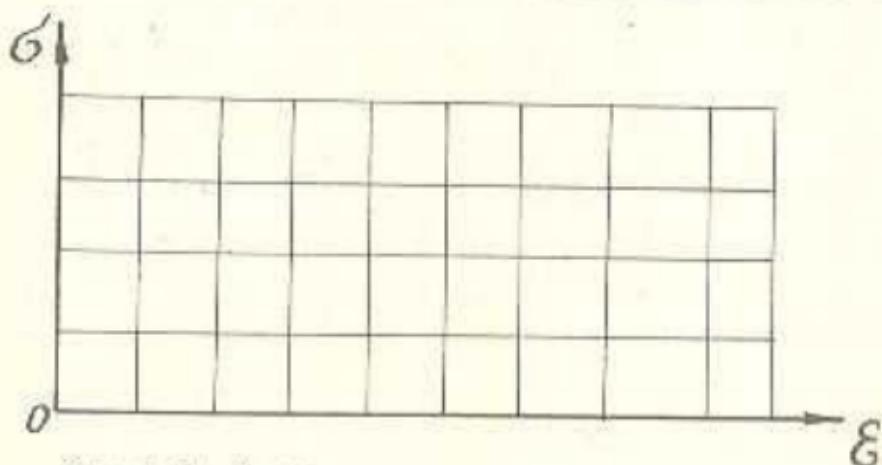


Рис. I.2. Условная и схематизированная диаграмма

Вид разрушения

Особенности разрушения

Марка стали (ориентировочно)

Допускаемое напряжение  $[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}$ Подпись преподавателя \_\_\_\_\_  
"\_\_\_" \_\_\_ 19 \_\_\_ г.

## Приложение 2

## ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ

Цель работы:

изучение поведения пластичных, хрупких, изотропных и анизотропных материалов при испытании на сжатие и определение их основных механических и расчетных характеристик. Испытание проводится путем статического сжатия образцов на универсальной гидравлической машине.

Таблица 2.1

№ пп	Материал образца	Размеры образца, см		Площадь попереч- ного сечения $A_0, \text{см}^2$	Нагрузка наибольшая или разру- шающая $F, \text{kN}$
		диаметр $d$ или сто- роны $a$	высота $h$		
I					
2					
3					
4					
5					
6					

Таблица 2.2

Основные характеристики	МАТЕРИАЛ		
		Дерево	
		вдоль волокон	поперек волокон
Способность к разрушению	Вид образцов	до испытания	после испытания
Характеристика прочности при сжатии, МПа	вид диаграмм напряжений при сжатии		
Допускаемое напряжение, МПа		$\sigma_B = \frac{F_B}{A_0}$	
		$\sigma'_B =$	$\sigma''_B =$
		$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{n_B}$	

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ

Цель работы:

экспериментальная проверка закона Гука при растяжении, определение модуля Енга и коэффициента Пуассона.

Испытания проводится путем статического растяжения плоского образца из малоуглеродистой стали на универсальной испытательной машине с измерением удлинений деформаций рычажным тензором ТР-1.

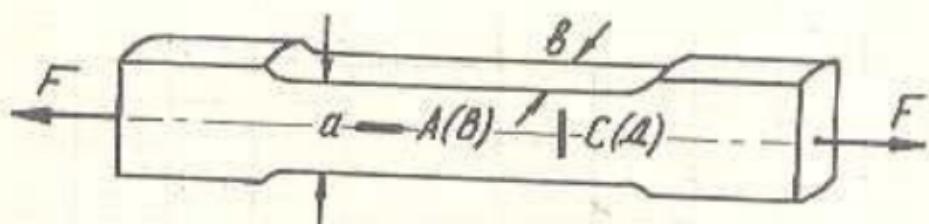


Рис.3.1. Эскиз образца и схема установки тензометров

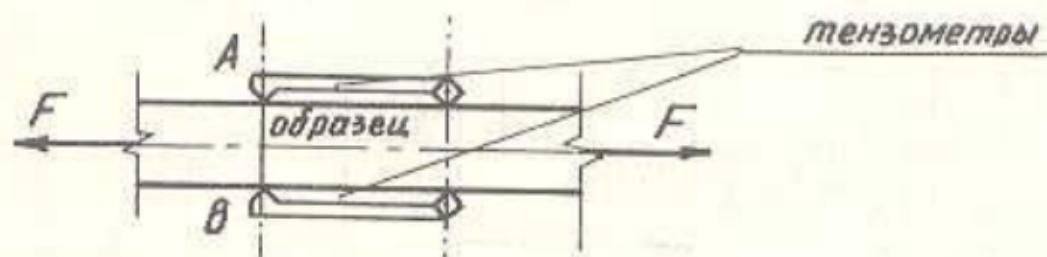


Рис. 3.2. Установка тензометров А и В (вид сверху)

Таблица 3.1

Материал образца	Размеры образца, см		Площадь поперечного сечения $A_0, \text{см}^2$	Характеристики тензометра ТР-1	
	ширина $a$	толщина $b$		база $\ell_0, \text{мм}$	коэффициент увеличения - $K$

Таблица 3.2

Нагрузка F	$\Delta F$	Отсчеты по тензометрам									
		продольных деформаций					поперечных деформаций				
		по шкале приборов	абсолют. разность	средняя разность	по шкале приборов	абсолют. разность	средняя разность				
		A	B	$\Delta A$	$\Delta B$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{2}$	C	D	$\Delta C$	$\Delta D$	$\frac{\Delta C + \Delta D}{2}$
0											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
		$\Delta F =$		$\Delta n_{cp} =$					$\Delta n'_{cp} =$		

Таблица 3.3

Характеристики, полученные после испытания	Упругие постоянные		$E = \frac{\Delta F}{A_0 \cdot \varepsilon}$	МПа
	коэф.	Пуассона		
			$\varepsilon = \frac{\Delta n_{cp}}{K \cdot \ell_0}$	$\delta / \rho$
			$\varepsilon' = \frac{\Delta n'_{cp}}{K \cdot \ell_0}$	$\delta / \rho$

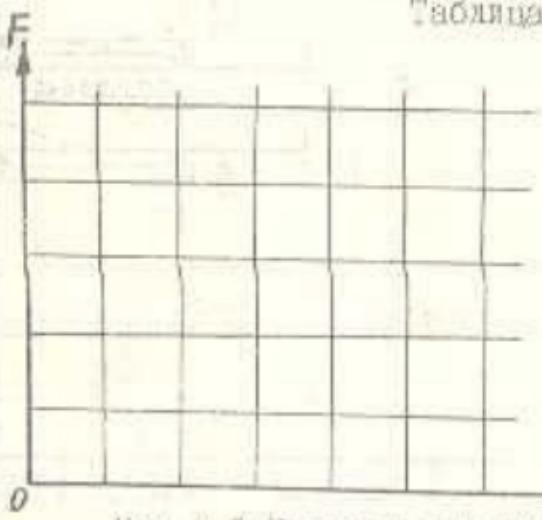


Рис. 3.3. Упругий участок диаграммы растяжения

Подпись преподавателя  
" " 19 г.

## ИСПЫТАНИЕ НА КРУЧЕНИЕ

Цель работы:

изучение поведения пластичного и хрупкого материалов при статическом кручении и определение их механических характеристик.

Испытание проводится путем кручения до разрушения стандартных образцов круглого поперечного сечения на испытательной машине ЮИ-50-1 с автоматической записью диаграмм кручения.

Таблица 4.1

№ п/п	Материал	Размеры образца, см		Полярный момент сопротивления $W_P = \frac{\pi d^3}{16}, \text{ см}^3$
		диаметр, $d$	длина, $\ell$	
1				
2				

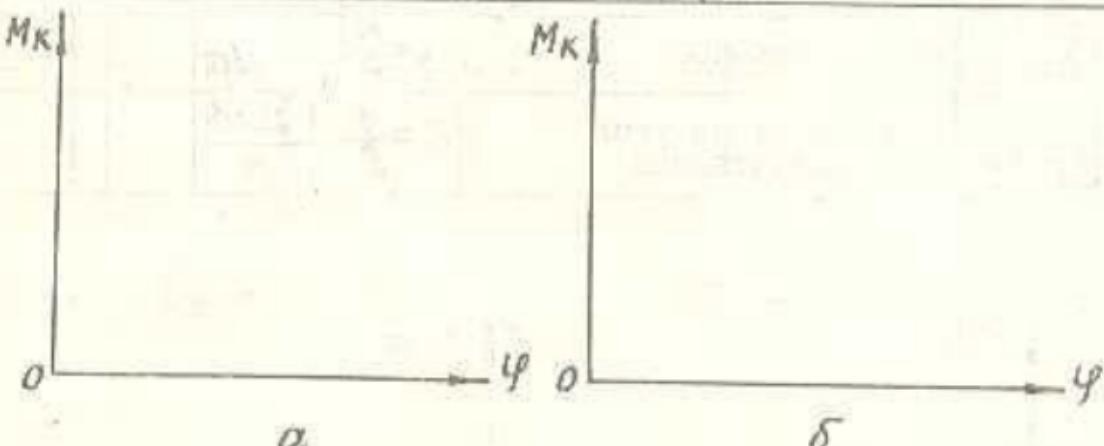


Рис.4.1.Диаграммы кручения: а - сталь; б - чугун

Таблица 4.2

Материал	С т а л ь	Ч у г у н
Вид образцов до испытания		
Вид излома		
Свойства разрушения		

Таблица 4.3

Материал образцов		Сталь	Чугун
Данные испытаний	Крутящий момент, соответствующий пределу пропорциональности	$M_{пц}$	$\text{кг}\cdot\text{см}$
	Крутящий момент, соответствующий пределу прочности	$M_B$	$\text{кг}\cdot\text{см}$
	Число оборотов	$n$	$\delta/p$
	Полный угол закручивания	$\varphi = 2\pi n$	рад.
Механические характеристики	предел пропорциональности	$\tau_{пц} = \frac{M_{пц}}{W_p}$	$\text{МПа}$
	предел прочности	$\tau_B = \frac{M_B}{W_p}$	$\text{МПа}$
	относительный угол закручивания	$\theta = \frac{\varphi}{l}$	$\frac{\text{рад.}}{м}$

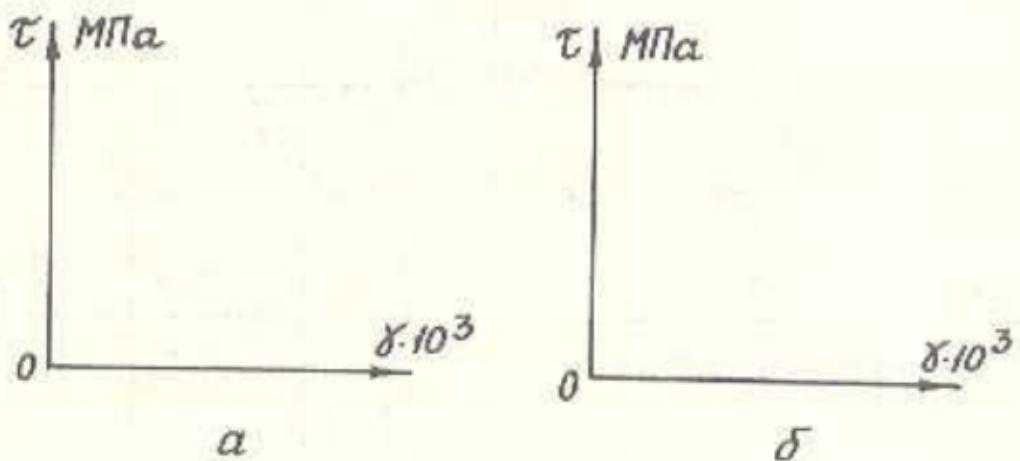


Рис.4.2. Диаграммы напряжений при кручении и их схематизация:  
а - сталь; б - чугун

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_  
"\_\_\_" \_\_\_\_ 19 \_\_\_\_ г.

## ИСПЫТАНИЯ НА СФЕЗ

## Цель работы

определение предела прочности углеродистой стали на срез и его сравнение с пределом прочности при растяжении.

Испытание проводится на универсальной машине с использованием специального приспособления, осуществляющего перерезывание цилиндрического образца по двум плоскостям.

Таблица 5.1

Материал образца	Диаметр образца <i>d</i> , см	Площадь поперечного сечения <i>A</i> , см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка <i>F<sub>B</sub></i> , кН	Предел прочности на срез $\tau_B = \frac{F_B}{A_{ср}}$ , МПа

$$\text{Вивод: } \tau_B = \sigma_B =$$

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_  
" — " 19 г.

## ИСПЫТАНИЕ НА ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ

Цель работы:

изучение поведения конструкционного материала и определение вязкости разрушения при отрыве  $K_{Ic}$ . Испытание образца проводится при внецентренном растяжении на универсальной машине. Образец имеет надрез и усталостную трещину. Разрушение определяется методом акустической эмиссии.

Таблица 6.1

Материал образца	$t$ , мм	Длина критической трещины					$C_{кр}$	$F_1$ , кг	$\sigma_1 = \frac{F_1}{C_{кр} t}$ кг/мм <sup>2</sup>			
		в точках										
		1	2	3	4	5						

Вид образца до испытания:



Рис. 6.1. Издам половины образца после разрушения

Особенности разрушения:

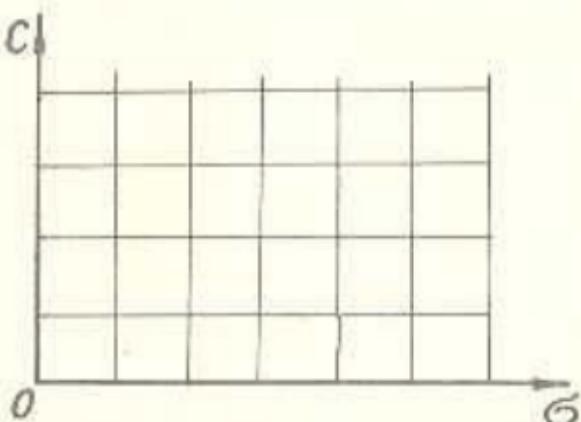


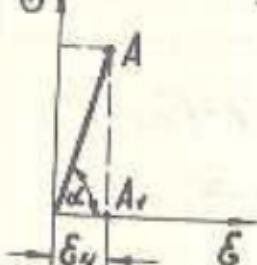
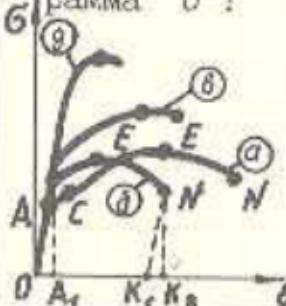
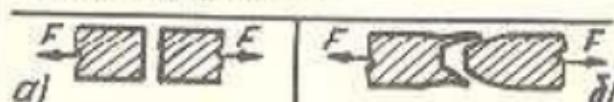
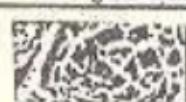
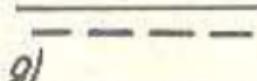
Рис. 6.2. График зависимости длины трещины от напряжения

Подпись преподавателя

"\_\_\_" \_\_\_ 19 г.

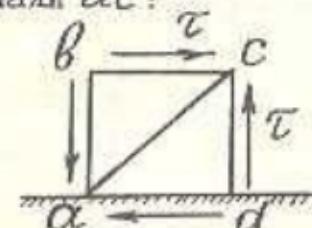
СБРАЗЕЦ КАРТЧКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ  
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ-СЖАТИЕ

Вопросы	Ответы			
1. Каким соотношением определяется предел упругости?	1. $\sigma_{nu} = F_{nu}/A_0$ 2. $\sigma_B = F_{max}/A_0$ 3. $\sigma_y = F_y/A_0$ 4. $\sigma_T = F_T/A_0$			
2. Каким отрезком на диаграмме растяжения определяется упругая деформация к моменту разрыва образца?	1. $K'K''$ 2. $OK'$ 3. $OK''$ 4. $A'K'$ 5. $m'm''$			
3. К какой группе материалов относится испытанный на сжатие образец в графике "б"?	1. Хрупкий 2. Пластичный 3. Анизотропный			
Графа а б в г				
а	б	в	г	
4. Какому $l$ соответствует расчетная длина образца?	1. $l_1$ 2. $l_0$ 3. $l_2$ 4. $l_3$			
5. Как определяется допускаемое напряжение для хрупких материалов, если $K$ - коэффициент запаса?	1. $[\sigma] = \sigma_T/K$ 2. $[\sigma] = \sigma_B/K$ 3. $[\sigma] = \sigma_{nu}/K$ 4. $[\sigma] = \sigma_y/K$			

Вопросы	Ответы
<p>6. </p> <p>1. Какой материал характеризует показанная схематизированная диаграмма?</p>	<p>1. Идеально упругопластичный 2. Идеально упругий 3. Упругопластичный с упрочнением 4. Гастроупластичный</p>
<p>2. Какая из приведенных функций применяется для расчетов на прочность согласно диаграмме вопроса 1?</p>	<p>1. <math>\sigma = \sigma_0</math> 2. <math>\sigma = \sigma_0(1-h) + hE\varepsilon</math> 3. <math>\varepsilon = A\sigma^n</math> 4. <math>\sigma = E\varepsilon</math></p>
<p>3. Сравните диаграммы растяжения. К какой стали относится диаграмма "б"?</p> <p>6. </p>	<p>1. Среднелегированной 2. Малоуглеродистой 3. Малоуглеродистой, подвергнутой наклеец 4. Закаленной и низкоотпущеной</p>
<p>4. Каким отрезком определяется относительная упругая деформация в моменте разрыва образца на диаграмме "б"?</p>	<p>1. OA<sub>1</sub> 3. OK<sub>2</sub> 4. K<sub>1</sub>K<sub>2</sub> 2. OK<sub>1</sub> 5. A<sub>1</sub>K<sub>1</sub></p>
<p>5. Какие сочетания из трех видов изображений соответствуют хрупкому разрушению?</p> <p></p>	<p>1. a, b, g 2. б, г, е 3. а, г, ж 4. а, г, е 5. б, в, ж</p>
<p><u>Визуальное исследование</u></p> <p>б  г </p> <p><u>Микроскопическое исследование</u></p> <p>в  е </p> <p><u>Схематическое представление трещин</u></p>	

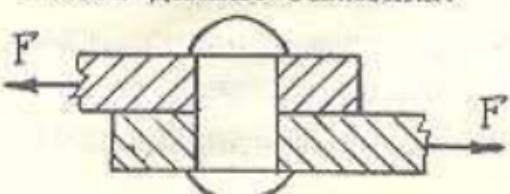
ОБРАЗЕЦ КАРТОЧКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ  
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ НА КРУЧЕНИЕ – СДВИГ

ВОПРОСЫ	ОТВЕТЫ
1. В каких координатах строится диаграмма напряжений при кручении?	1. $\sigma = f(\varepsilon)$ 4. $\sigma = f(t)$ 2. $F = f(\Delta \ell)$ 5. $M_K = f(\varphi)$ 3. $\tau = f(\gamma)$
2. Какая особенность разрушения деревянного образца при кручении?  Образующая – линия, нанесенная на поверхности цилиндрической части образца вдоль его оси.	1. Скалывание вдоль волокон параллельно образующей. 2. Отрыв по наклонным сечениям под углом 45° к образующей. 3. Срез по поперечному сечению; образующая обращается в винтовую линию.
3. Какая деформация от действия касательных напряжений произойдет в направлении диагонали $\alpha c$ ?	1. Сдвиг. 2. Растижение. 3. Кручение. 4. Сжатие.
4. Каким соотношением определяется предел прочности при кручении?	1. $T_B = \frac{F_B}{A_{cp}}$ 4. $T_T = \frac{M_T}{W_P}$ 2. $T_B = \frac{M_A}{W_P}$ 5. $T_{nц} = \frac{M_{nц}}{W_P}$ 3. $\sigma_T = \frac{F_T}{A_o}$
5. Сколько плоскостей среза имеет данная закледка?	1. Две. 2. Три. 3. Одна.



4. Каким соотношением определяется предел прочности при кручении?

5. Сколько плоскостей среза имеет данная закледка?



## ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

1. ОДНОРОДНЫЙ МАТЕРИАЛ – материал, свойства любых весьма малых частиц которого совершенно тождественны.
2. ИЗОТРОПНЫЙ МАТЕРИАЛ – материал, физико-механические свойства которого одинаковы во всех направлениях.
3. АНИЗОТРОПНЫЙ МАТЕРИАЛ – материал, физико-механические 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 раздедения напряженного тела на части без какой-либо поддающейся измерению неупругой деформации. Хрупкий излом имеет лущистое микростроение.
12. ТВЕРДОСТЬ ТЕЛА – его способность сопротивляться внедрению в него другого более твердого тела (внедрителя).
13. ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ (технический) – наибольшее напряжение, при котором в материале образца не обнаруживаются микроскопические остаточные деформации. Его природа обусловлена обратимыми изменениями межатомных расстояний, устранившимися после снятия нагрузки.

14. ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ (технический) – напряжение, при котором в материале образца происходит быстрый рост пластических деформаций без заметного увеличения нагрузки. Его природа (механизм скольжения) обусловлена одновременным образованием пластических сдвигов по кристаллографическим плоскостям большинства зерен, благоприятно ориентированных к линии действия силы под углом близким к  $45^{\circ}$ .
15. ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ (технический) или временное сопротивление – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, которую выдерживает материал образца, приходящейся на единицу первоначальной площади поперечного сечения. Его природа обусловлена нарушением межатомных связей вследствие роста трещин.
16. ФИЗИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ – соответствует первому сдвигу по кристаллографической плотности скольжения зерна, благоприятно ориентированной к линии действия силы под углом близким к  $45^{\circ}$ .
17. ФИЗИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ – соответствует нескольким (немногим) сдвигам по кристаллографическим плоскостям, происходящим практически одновременно в зернах, ориентированных по отношению к линии действия силы под углом близким к  $45^{\circ}$ .
18. УСЛОВНЫЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ  $\sigma_{0.2}$  – напряжение, при котором остаточная деформация достигает условной величины, принятой равной 0,2%.
19. ДЕСТРУКЦИЯ МАТЕРИАЛА – микроразрушения, связанные с нарушением межатомных связей, и приводящие к появлению микротрещин.
20. КВАНТ РАЗРУШЕНИЯ – длина минимально возможного "ката" трещины в заданных условиях ее развития, зависящего от свойств материала и особенностей разрушения.
21. НАГЕП (упрочнение) – изменение структуры и свойств упруго-пластичного материала в результате предварительного нагружения выше предела текучести.
22. ЭФФЕКТ БАУИНГЕРА – уменьшение пределов пропорциональности к текучести при растяжении после предшествующего нагружения сжатием и наоборот.
23. ЛЕНД ГИСТЕРЕЗИСА – необратимые потери энергии деформации в результате несовпадения кривой нагружения с кривой разгрузки.

24. ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ – наибольшее значение максимального напряжения, при котором образец не разрушается при неограниченно большом числе циклов нагружения.
25. ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ – способность материала сопротивляться распространению трещин.
26. КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ  $K$  – мера интенсивности напряжений у вершины трещины и вязкости разрушения.
27. КРИТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ или вязкости разрушения  $K_c$  – количественная характеристика поля напряжений на стадии возникновения разрушения близи вершины трещины и впереди ее, а также критерий разрушения (материальная константа) при определенных условиях разрушения:
- $K_{Ic}$  – вязкость разрушения при отрыве;
- $K_{IIc}$  – вязкость разрушения при поперечном сдвиге;
- $K_{IIIc}$  – вязкость разрушения при продольном сдвиге.
28. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ – максимально возможная прочность материала, следующая из величины силы межатомной связи.
29. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ – прочность материала в конструкции, определяющаяся его способностью сопротивляться распространению трещин при заданных условиях нагружения и эксплуатации.
30. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ – сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые или малорастворимые друг в друге компоненты, разделенные в материале ярко выраженной границей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов.-Киев:Выща школа,1979.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов.-М.:Наука.Гл.ред.физ.-мат.лит.,1986.
3. Тимошенко С.П., Гера Дж. Механика материалов.-М.:Мир,1976.
4. Биргер И.А., Манютов Р.Р. Сопротивление материалов.-М.:Наука.Гл.ред.физ.-мат.лит.,1986.
5. Смирнов А.Ф. Сопротивление материалов.-М.:Высшая школа,1975.
6. Гастев В.А. Краткий курс сопротивления материалов.-М.:Наука.Гл.ред.физ.-мат.лит.,1977.
7. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов.-Киев:Наукова думка,1978.
8. Гийон Н. Предварительно напряженный железобетон.-М.:Госстройиздат,1959.
9. Беляев Н.М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов.-М.:Госиздат.Тех.-теор.лит.,1956.
10. Золоторевский В.С. Механические испытания и свойства металлов.-М.:Металлургия,1974.
11. Михайлов А.М. Основы расчета элементов строительных конструкций в примерах.-М.:Высшая школа,1986.
12. Иванова В.С. Разрушение металлов.-М.:Металлургия,1979.
13. Криштал М.А., Эпштейн Л.Е. Механические и физические особенности разрушения металлов.-МиТом.-1978.-№4.
14. Криштал М.А., Эпштейн Л.Е. Физические особенности зарождения и роста трещин.-МиТом.-1980.-№1.
15. Криштал М.А., Эпштейн Л.Е., Гохберг Я.А. и др. Особенности деформации и разрушения слоистых биметаллов. Проблемы прочности.-Киев.-1984.-№4.
16. Гуревич С.А. Энергетическая интерпретация стадийности роста усталостной трещины//Материалы VIII Всесоюзной конференции по усталости металлов.-М.,1982.
17. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. РД50-260-81.-М.:Стандарт,1982.

18. Каракенцева Т.Г. Методические указания к самостоятельной работе по курсу сопротивления материалов для студентов машиностроительных специальностей. -Тольятти, 1986.
19. Сборник терминов по классической механике, группа 10 сопротивление материалов.-Варшава:Отдел технической терминологии, 1965.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>I. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ, УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>4</b>
I.1. Понятие о механизме упругой и пластической деформации при растяжении пластичных материалов.....	5
I.2. Пластическое и хрупкое разрушение.....	15
I.3. Влияние химического состава и способа обработки стали на вид диаграммы растяжения.....	18
I.4. Понятие о механизме процессов разрушения хрупких материалов.....	22
I.5. Поведение пластичных и хрупких материалов при повторном нагружении.....	24
I.6. Влияние скорости нагружения на механические характеристики и модули упругости материала.....	26
<b>2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА ТРЕЩИН.....</b>	<b>28</b>
2.1. Конструкционная прочность.....	28
2.2. Распространение трещин и разрушение.....	31
2.3. Вязкость разрушения и критерий $K_{Ic}$ для анализа конструкционной прочности материалов.....	34
2.4. Композиционные материалы.....	38
СХЕМА 3.1.....	43
СХЕМА 3.2.....	44
СХЕМА 3.3.....	45
СХЕМА 3.4.....	46
СХЕМА 4.1 и 4.2.....	47
СХЕМА 4.3.....	48
СХЕМА 4.4.....	49
СХЕМА 5.1.....	50
Выполнение лабораторных работ.....	51

<b>3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ</b>	
<b>ПО ЦИКЛУ РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ.....</b>	<b>51</b>
3.1. Испытание углеродистой стали на растяжение с определением расчетных характеристик.....	51
3.2. Испытание образцов из различных материалов на сжатие с определением расчетных характеристик..	52
3.3. Определение упругих постоянных материала-модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона.....	61
3.4. Вопросы к защите цикла лабораторных работ на растяжение и сжатие.....	64
<b>4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЦИКЛУ</b>	
<b>КРУЧЕНИЕ И СДВИГ.....</b>	<b>66</b>
4.1. Испытание стального и чугунного образцов на кручение.....	66
4.2. Испытание стального образца на срез.....	70
4.3. Вопросы к защите цикла лабораторных работ на кручение и сдвиг.....	72
<b>5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ</b>	
<b>ПО ЦИКЛУ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ.....</b>	<b>74</b>
5.1. Испытание конструкционных материалов на вязкость разрушения при стриве - критерий $K_{Ic}$ .....	74
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	
Приложение 1. Испытание на растяжение.....	77
Приложение 2. Испытание на сжатие.....	79
Приложение 3. Определение упругих постоянных.....	81
Приложение 4. Испытание на кручение.....	83
Приложение 5. Испытание на срез.....	85
Приложение 6. Испытание на вязкость разрушения.....	86
Приложение 7. 7.1, 7.2, 7.3.....	87
Приложение 8. Основные термины и понятия .....	90
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>93</b>

Св.план 1988 г., поз.686

ЛЮДМИЛА ЕВГЕНЬЕВНА ЭПШТЕЙН

ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

Редактор                    Е.С.Поздеева  
Корректор                Л.Г.Садовская

Подписано в печать 26.05.88  
Формат 60x84/16.  
Усл.п.л.5.5. Уч.-изд.л.5.0. Тираж 1000 экз.  
Цена 15 к.

Тольяттинский политехнический институт. Тольятти. Белорусская, 14