



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «Строительная механика и теория сооружений»

Учебно-методическое пособие
по самостоятельному изучению студентами
темы «Физико-механические свойства
основных строительных материалов»
по дисциплинам

**«Сопротивление
материалов»,
«Техническая механика»»**

Авторы
Бондаренко В. П.

Ростов-на-Дону, 2024

Аннотация

Учебно-методическое пособие содержит основные теоретические положения, а также описание видов лабораторных исследований на тему «Физико-механические свойства основных строительных материалов» по дисциплинам сопротивление материалов, специальные вопросы сопротивления материалов, механика, теоретическая механика для архитекторов, строительная механика для архитекторов.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения (очной, очно-заочной, заочной) технических направлений подготовки (специальностей), в частности, для студентов, обучающихся по направлениям: 08.03.01 – Строительство; 07.03.01 – Архитектура; 07.03.02 – Реконструкция и реставрация архитектурного наследия; 07.03.04 – Градостроительство; 23.03.03 – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 29.03.04 – Технология художественной обработки материалов и специальностям: 08.05.01 – Строительство уникальных зданий; 08.05.02 – Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей; 21.05.01 – Прикладная геодезия; 23.05.01 – Наземные транспортно-технологические средства.

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Сопротивление материалов» Бондаренко В.П.

Оглавление

1. Основные механические характеристики прочности материалов	4
2. Механические испытания материалов. Изучение диаграммы растяжения низкоуглеродистой строительной стали.....	5
3. Диаграмма условных напряжений. Механические характеристики материалов	13
4. Диаграмма растяжения пластичных материалов, не имеющих площадки текучести.	15
5. Диаграмма растяжения хрупких материалов.....	18
6. Характер разрушения при сжатии пластичных и хрупких материалов. Диаграмма сжатия.....	19
7. Допускаемое напряжение	25
8. Сравнительные характеристики пластичных и хрупких материалов	27
Вопросы для самоконтроля	32
Рекомендуемая литература	33

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Практическое применение различных материалов требует от конструкторов и проектировщиков знание основных физико-механических свойств этих материалов.

Механические характеристики материалов являются критериями, по которым оценивается прочность и деформативность конструкций, подбираются размеры поперечных сечений, определяются допускаемые нагрузки, то есть решаются основные задачи сопротивления материалов. Поэтому, чтобы использовать конкретный материал для изготовления проектируемой конструкции, необходимо экспериментально установить механические характеристики этого материала.

Эти характеристики в виде числовых показателей получают в лабораторных условиях в результате определенных испытаний образцов, изготавливаемых из данного материала.

Механическими испытаниями называется экспериментальное исследование свойств материалов на специальных образцах, форма и размеры которых устанавливаются государственными стандартами (ГОСТ) или техническими условиями (ТУ). Механические испытания позволяют выяснить ряд важных моментов. Во-первых, насколько справедлив для данного материала закон Гука, устанавливающий прямо пропорциональную зависимость между напряжениями и деформациями

$$\sigma = E \cdot \epsilon.$$

Этот закон применим лишь в тех пределах, в которых он находит прямое экспериментальное подтверждение. Например, для стали ее упругие свойства проявляются в сравнительно широком диапазоне напряжений и закон Гука для нее является весьма точным, а такие мягкие материалы как свинец и медь испытывают пластические деформации уже при малых нагрузках и вряд ли могут считаться упругими.

Следовательно, прежде чем распространять выводы сопротивления материалов на тот или иной материал, предварительно необходимо подвергнуть данный материал всестороннему механическому испытанию.

Во-вторых, механические испытания позволяют экспериментально установить основные механические свойства материа-

ла. Исследовать поведение материала под нагрузкой вплоть до разрушения необходимо для выявления в первую очередь тех характеристик, которые позволяют решать одну из основных задач сопротивления материалов – обеспечение прочности элементов конструкций.

И, наконец, в-третьих, некоторые основные допущение сопротивления материалов могут быть экспериментально подтверждены лишь в ограниченном количестве частных случаев, тогда как теория придает им универсальный характер. Поэтому одной из важнейших задач механических испытаний является выяснение опытным путем справедливости различных гипотез и установление границ их практического применения.

К основным механическим характеристикам прочности материала, которые определяются в результате испытаний образцов, относятся:

- предел пропорциональности – $\sigma_{pr} (\sigma_{пц})$;
- предел текучести – $\sigma_e (\sigma_{т})$;
- предел прочности (временное сопротивление) – $\sigma_u (\sigma_{пч})$.

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

Для определения основных показателей прочности проводят лабораторные испытания данного материала. Наиболее распространенным механическим испытанием является испытание цилиндрического образца статической нагрузкой на одноосное растяжение. Только при таком напряженном состоянии можно установить необходимые механические характеристики, не прибегая к упрощающим гипотезам. Кроме того, сам опыт на растяжение методически достаточно прост и требует сравнительно несложного оборудования.

Для того, чтобы результаты испытания одного и того же материала, проводимые в разных лабораториях были сопоставимы, образцы должны отвечать определенным требованиям. Поэтому, образцы, испытываемые на различных установках, могут иметь разные размеры, но соотношение некоторых из них строго нормируются. Например, образец для испытания на разрывной машине УРМ-5 имеет следующий вид (рис. 1)

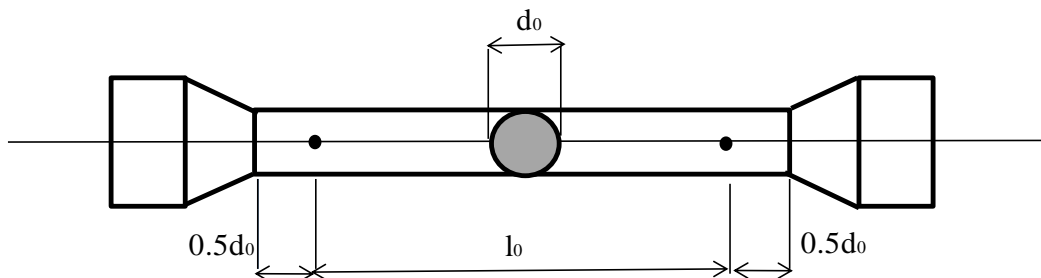


Рис. 1. Образец для испытания на растяжение

Цилиндрические уширения (головки) на концах образца служат для захвата образца зажимами разрывной машины. Конические участки уменьшают концентрацию напряжений при переходе от головок к рабочей части образца, тем самым исключается возможность отрыва головок во время испытания.

Кроме того, такое сопряжение рабочей части с головками в значительной мере уменьшает влияние головок на деформацию рабочей части образца. На цилиндрической части образца, имеющей диаметр d_0 , двумя рисками выделяется так называемая рабочая часть образца l_0 .

При изготовлении образцов должны быть выполнены требования, предъявляемые нормативами проведения данного вида испытаний, а именно, отношение рабочей части (расчетной длины) образцов к диаметру поперечного сечения должно равняться $l_0/d_0 = 10$. В некоторых случаях, например, если испытания проводятся на установках небольшой мощности, допускается проводить испытания на укороченных образцах с соотношением $l_0/d_0 = 5$.

Испытание на растяжение проводятся на специальных разрывных машинах. Образец, помещенный в захваты машины, подвергается центральному растяжению. Растягивающая сила создается при помощи механических или гидравлических домкратов. Для получения достоверных результатов испытания, нагружение должно производиться непрерывно, плавно и достаточно медленно. При таких условиях ускорение частиц материала в процессе деформирования практически равны нулю, что позволяет считать нагружение статическим.

Наиболее показательным, с точки зрения учебных целей, является испытание образцов из низкоуглеродистой стали, такой, например, как сталь марки Ст.3. Практически все известные на настоящее время испытательные установки позволяют получить график зависимости между продольным усилием в испытываемом

образце **F** и абсолютным его удлинением Δl . Этот график называется диаграммой растяжения (рис. 2).

Диаграмма растяжения дает наглядное представление о том, какие стадии работы проходит материал образца от начала нагружения вплоть до разрыва.

Рассмотрим характерные участки и точки диаграммы растяжения.

От начала нагружения до определенного значения растягивающей силы $F_{пц}$ (точка **A**) имеет место прямая пропорциональная зависимость между силой **F** и удлинением Δl (участок **OA**)

$$F_{пц} = k \cdot \Delta l .$$

Эта пропорциональность впервые была замечена в 1670 г. Робертом Гуком и получила в дальнейшем название **Закона Гука**. Величина силы $F_{пц}$, до которой остается справедливым закон Гука, зависит от размеров образца и физических свойств материала.

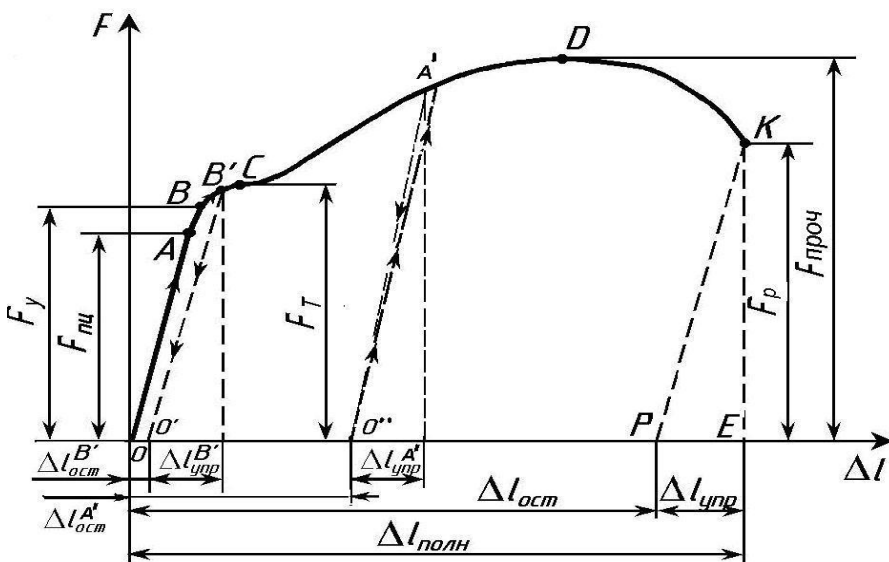


Рис. 2 Диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали Ст.3.

Напряжение, вызванное этой силой, называется пределом пропорциональности и вычисляется по формуле

$$\sigma_{пц} = F_{пц} / A_0,$$

где

A_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

Итак, **пределом пропорциональности называется максимальное напряжение, при котором материал подчиняется закону Гука.**

Чуть выше точки **A** находится точка **B**, а усилие соответствующее этой точке достигает значения F_y . Напряжение, возникающее в этот момент, называется **пределом упругости** и вычисляется по формуле

$$\sigma_y = F_y / A_0.$$

Участок диаграммы **OB** характеризует упругую стадию работы материала и называется **участком упругости**. Деформации, которые испытывает образец в это время, являются абсолютно упругими. Эти деформации полностью исчезают после снятия нагрузки.

Следовательно: **пределом упругости называется максимальное напряжение, при котором материал образца работает абсолютно упруго.**

Пока сила не достигнет величины F_y , вызванные ею деформации будут полностью исчезать при разгрузке. Процесс разгрузки при этом будет изображаться той же линией, что и линия нагружения.

Предел упругости является характеристикой, не связанной с законом Гука. Точка **B** располагается достаточно близко к точке **A**, следовательно значения напряжений $\sigma_{пц}$ и σ_y близки друг другу и обычно различием между ними пренебрегают.

При дальнейшем нагружении образца, когда усилие превышает усилие F_y (точка **B'**), при разгрузке образца деформации полностью не исчезают и на диаграмме линия разгрузки будет представлять собой прямую **B'O'**, уже не совпадающую с линией нагружения, а параллельную ей. В этом случае деформация образца состоит из упругой $\Delta l_{упр}$ и пластической (остаточной) $\Delta l_{ост}$ деформации.

При дальнейшем увеличении нагрузки (выше точки **B**) диаграмма растяжения становится криволинейной и плавно поднимается до точки **C**, где наблюдается переход к горизонтальному участку, называемому участком текучести или площадкой текучести. На этой стадии растяжения **удлинение образца растёт**

при постоянном значении растягивающей силы F_T . Такой процесс деформации называется текучестью материала. Он сопровождается остаточным (пластическим) удлинением, не исчезающим после разгрузки.

Пределом текучести σ_T называется напряжение, при котором происходит рост деформаций образца при постоянном растягивающем усилии F_T , и вычисляемое по формуле

$$\sigma_T = F_T / A_0.$$

Начало текучести соответствует наступлению некоторого критического состояния металла, которое может быть обнаружено не только по остаточным деформациям, но и по ряду других признаков. При пластической деформации повышается температура образца, у стали изменяются электропроводность и магнитные свойства. Если отшлифовать поверхность образца, то в процессе текучести на отшлифованной поверхности появляются линии, наклоненные примерно под углом 45° к оси образца (рис. 3)

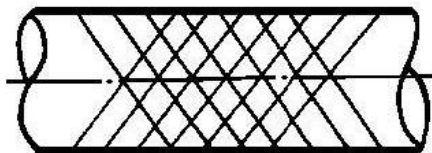


Рис. 3 Линии Чернова

Эти линии являются следами взаимных сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями.

Линии сдвига называются линиями Чернова по имени известного русского металлурга Д. К. Чернова (1839 – 1921), впервые обнаружившего их.

После прохождения текучести, материал снова приобретает способность сопротивляться растяжению. Этот участок диаграммы **СД** называется **участком упрочнения** (рис. 2).

В точке **Д** усилие достигает максимального значения $F_{пч}$. Наличие участка упрочнения (от конца площадки текучести до наивысшей точки диаграммы растяжения) объясняется структурными изменениями материала: когда нагрузка на образец возрастает, микроскопические дефекты (линейные и точечные) группируются так, что развитие сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями, затрудняется, а потому сопро-

тивление материала сдвигу начинает возрастать и приближаться к его сопротивлению отрыву.

Нормальное напряжение $\sigma_{пч}$ в момент достижения усилием значения $F_{пч}$ называется **пределом прочности или временным сопротивлением**.

Пределом прочности (временным сопротивлением) называется максимальное напряжение, которое может выдержать образец не разрушаясь.

Предел прочности вычисляется по формуле

$$\sigma_{пч} = F_{пч} / A_0.$$

Если образец нагрузить в пределах участка **СД**, например, до точки **А'**, и начать разгружать, то деформация его будет исчезать пропорционально снимаемой нагрузке, то есть по прямой **А'О''**, параллельной прямой **АО**.

При повторной нагрузке этого образца линия нагрузки совпадет с прямой **А'О''**, то есть увеличится участок пропорциональности, и далее пойдет по обычной траектории - по кривой **А'ДК**. Часть диаграммы, расположенная левее линии **А'О''**, окажется отсеченной, следовательно, начало координат переместится в точку **О''** (рис. 2 и рис. 4,а).

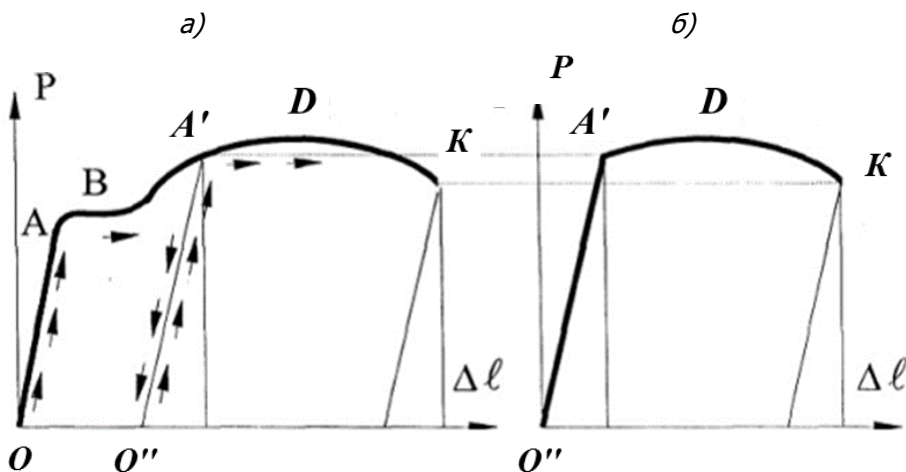


Рис. 4. Диаграммы растяжения

На этом рисунке

- а) – полная диаграмма для предварительно незагруженного образца;
- б) – укороченная диаграмма для предварительно загруженного до

точки **A'** образца.

Остаточное удлинение после разрыва будет меньше, чем в образце, не подвергавшемся предварительной пластической деформации.

Таким образом, предварительная вытяжка образца за предел текучести изменяет некоторые механические свойства стали - повышает ее предел пропорциональности, то есть делает ее более упругой, и уменьшает остаточное удлинение, то есть делает ее более хрупкой (рис. 4,б).

Изменение свойств материала образца в результате нагружения его за предел текучести, разгрузки и повторного нагружения называется наклепом.

После операции наклепа модуль упругости **E** возрастает примерно на 20-30 %.

При достижении усилия **F_{пч}** (точка **D**) на образце появляется местное сужение, так называемая **шейка разрыва** (рис. 5).



Рис. 5. Образование шейки разрыва образца

Под действием силы в месте появления шейки быстро уменьшается площадь сечения образца, что вызывает падение нагрузки.

В то же время резко увеличивается напряжение и в момент, соответствующий точке **K** диаграммы и силе **F_p**, происходит разрыв образца по наименьшему сечению, то есть в шейке.

До точки **D** диаграммы, соответствующей **F_{пч}**, каждая единица длины образца удлинилась примерно одинаково; точно так же во всех сечениях одинаково уменьшались поперечные размеры образца. С момента образования шейки вся деформация образца локализуется на малой длине ($l_{ш} \approx 2d_0$) в области шейки, а остальная часть образца практически не деформируется. Эпюра относительных удлинений образца представлена на рис. 6

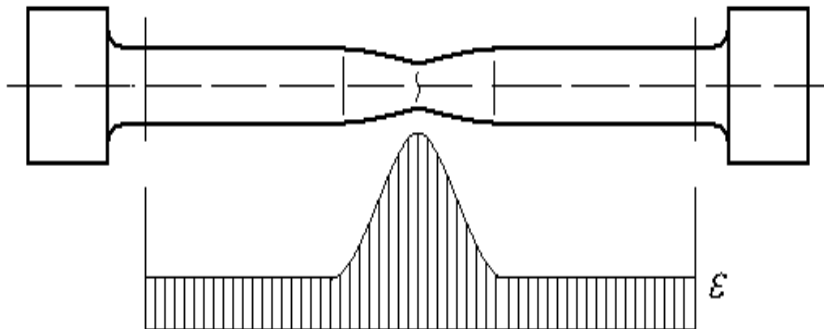


Рис. 6. Эпюра относительных удлинений образца в момент образования шейки разрыва.

Таким образом, к моменту образования шейки пластические деформации достигают полного развития.

В зоне шейки происходит резкое сужение поперечного сечения образца, сопровождающееся появлением микротрещин. В дальнейшем происходит процесс роста и слияния микротрещин в макротрещину, которая располагается перпендикулярно продольной оси образца.

После того как макротрещина достигает критических размеров, наступает процесс быстрого разрушения материала. Такое разрушение принято называть вязким или пластическим.

Таким образом, по наличию шейки разрыва образца можно судить о пластичности материала.

Нисходящий характер участка диаграммы растяжения **D – K** (рис. 2), объясняется тем, что площадь поперечного сечения шейки быстро уменьшается и для дальнейшей деформации образца требуется меньшая нагрузка.

Усилие, при котором происходит разрушение образца, называется усилием разрыва **F_p**.

Напряжение при разрыве, вычисляемое по отношению к начальной площади поперечного сечения образца, называется **условным напряжением разрыва** и вычисляется по формуле

$$\sigma_p^y = F_p / A_0.$$

Условное напряжение разрыва оказывается гораздо меньше предела прочности. В действительности напряжение разрыва **σ_p^A** на 60÷70% выше предела прочности. Оно вычисляется по формуле

$$\sigma_{pA} = F_p/A_1,$$

где

A_1 – площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (площадь шейки разрыва).

3. ДИАГРАММА УСЛОВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Координаты диаграммы растяжения $F - \Delta l$ (рис. 2) не являются качественными характеристиками материала, так как растягивающая образец сила F зависит от площади сечения, а удлинение образца Δl – от его длины.

Чтобы исключить влияние размеров образца и получить диаграмму, характеризующую поведение не образца, а самого материала, диаграмму растяжения перестраивают в координатах $\sigma - \epsilon$ (напряжение - относительное удлинение) путем деления ординат F на первоначальную площадь сечения образца A_0 , а абсцисс Δl на первоначальную длину образца l_0 .

Это равносильно изменению масштабов по обеим осям.

Перестроенная таким образом диаграмма называется **диаграммой условных напряжений** (рис. 7).

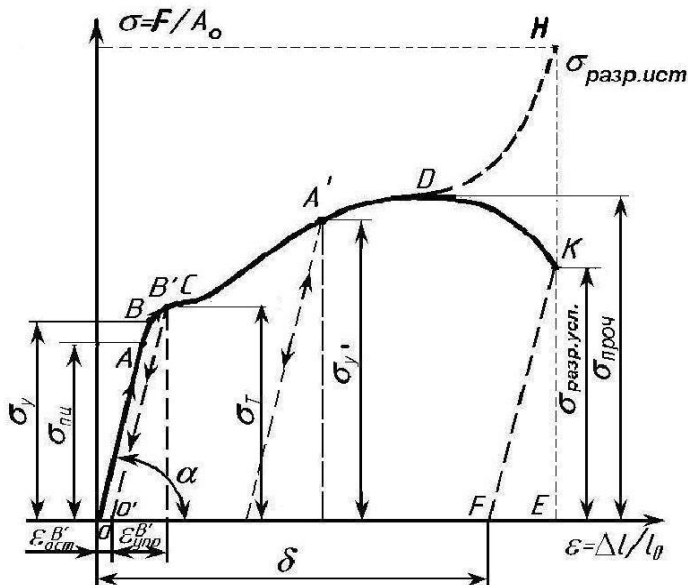


Рис. 7. Диаграмма условных напряжений.

Название «диаграмма условных напряжений» объясняет-

ся тем, что площадь образца в процессе испытания в действительности изменяется. До образования шейки (точка **D**) эти изменения незначительны, а вот на участке **DK** (рис. 7) с момента образования шейки действительная площадь поперечного сечения образца и первоначальная площадь **A₀**, по которой определяются ординаты диаграммы, значительно отличаются друг от друга.

Если величину силы на действительную площадь поперечного сечения образца **A**, можно получить значения **истинных напряжений** и построить кривую **истинных напряжений диаграммы DN**. Таким образом, на рис. 7 участок **DK** - условная диаграмма, а участок **DN** - истинная диаграмма напряжений образца.

Прямолинейный участок диаграммы **OA** соответствует участку упругости образца.

Закон Гука в данных координатах имеет вид

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Из диаграммы напряжений **σ - ε** видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \sigma / \varepsilon = E,$$

то есть **модуль упругости (Модуль Юнга) при растяжении равен тангенсу угла наклона прямолинейного участка диаграммы к оси абсцисс.**

Для пластичных материалов кроме характеристик прочности, к которым относятся предел пропорциональности - **$\sigma_{пц}$** , предел текучести - **$\sigma_{т}$** и предел прочности - **$\sigma_{пч}$** , не маловажное значение имеют также и характеристики пластичности, к которым относятся

– **относительное остаточное удлинение после разрыва**

$$\varepsilon_{ост} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%,$$

где

l_1 – длина расчетной части образца после разрыва;

l_0 – первоначальная длина расчётной части.

– **относительное остаточное сужение после разрыва**

$$\psi = \frac{A_{ш} - A_0}{A_0} \cdot 100\%,$$

где

A_0 – начальная площадь сечения образца;

$A_{ш}$ – площадь сечения шейки после разрыва образца.

Достаточно важной характеристикой упруго пластических свойств материала является величина **удельной работы**, то есть работы, затраченной на деформирование одной единицы объёма образца.

$$u = \frac{U}{V_0},$$

где

u – удельная работа;

U – полная работа, затраченная на разрушение образца;

$V_0 = A_0 \cdot l_0$ – объём расчётной части образца до испытания.

Полную работу можно определить, измерив площадь, ограниченную диаграммой растяжения и отрезком оси $\Delta l_{ост.}$ (рис. 2), или приближенно вычислить по формуле

$$U = \eta \cdot F_{nc} \cdot \Delta l,$$

где

η – коэффициент заполнения диаграммы растяжения, среднее значение которого для низкоуглеродистых сталей обычно принимается равным **0.85**.

Удельная работа u характеризует способность материала поглощать энергию при разрыве, вязкость материала и сопротивление его воздействию динамических нагрузок.

4. ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, НЕ ИМЕЮЩИХ ПЛОЩАДКИ ТЕКУЧЕСТИ.

Ярко выраженная площадка текучести на диаграмме растяжения присуща далеко не всем материалам, относящимся к категории пластичных. К материалам, имеющим площадку текучести, относятся стали с содержанием углерода в пределах $0,1 \div 0,3\%$. Например, сталь марки Ст. 3, а также латунь и некоторые бронзы. Для большинства металлов и сплавов характерен постепенный переход в пластичное состояние.

После упругой стадии работы диаграмма напряжений таких материалов получает закругление и затем сразу переходит в кривую, характеризующую стадию упрочнения. Для примера приведем диаграммы растяжения некоторых пластичных материалов, не имеющих ярко выраженной площадки текучести (рис. 8).

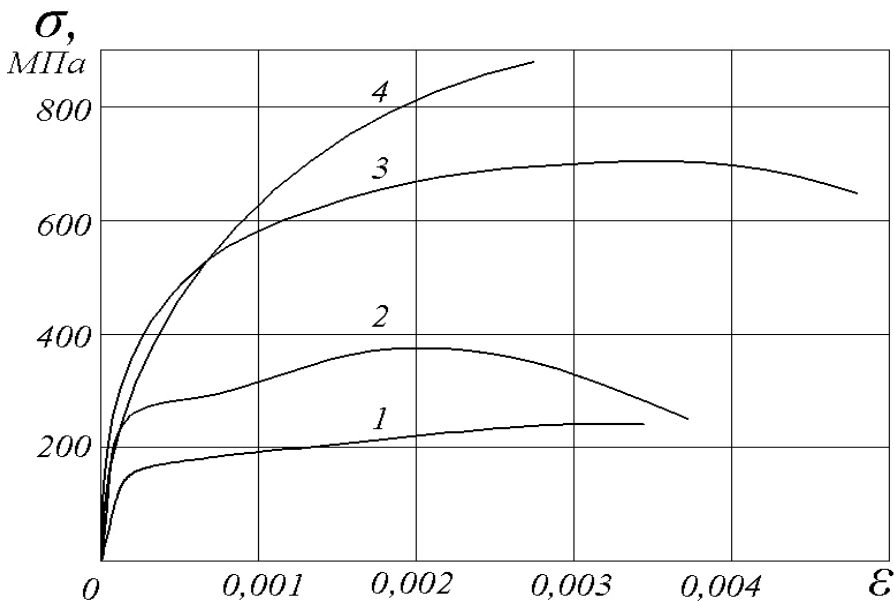


Рис. 8. Диаграммы напряжения пластичных материалов

На этом рисунке

1 – бронза; **2** – углеродистая сталь; **3** – никелевая сталь; **4** – марганцовистая сталь.

Таким образом, и при отсутствии ярко выраженной площадки текучести такие материалы ведут себя как пластичные, то есть разрушаются после развития больших остаточных деформаций.

Отсутствие площадки текучести затрудняет выявление предела текучести, а эта характеристика очень важна для таких материалов, как сталь и алюминиевые сплавы, так как ограни-

чивает их несущую способность. При нагрузке, соответствующей пределу текучести, материал в большинстве случаев не может считаться работоспособным с эксплуатационной точки зрения.

Для пластичных материалов, не имеющих площадки текучести, вводят понятие **условного предела текучести**. За него принимают напряжение, при котором относительное остаточное удлинение достигает того же значения, что и при наличии площадки текучести.

Обычно считается, что это происходит при $\epsilon_{ост} = 0,002$ (0,2%), поэтому условный предел текучести обозначают $\sigma_{0,2}$ (рис. 9).

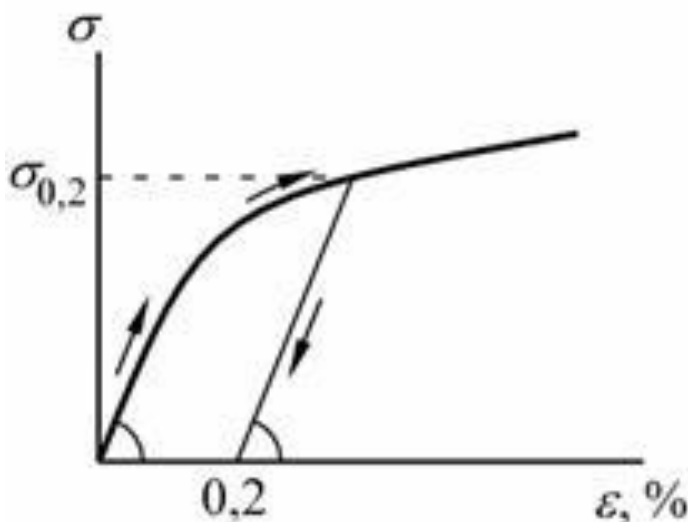


Рис. 9. Условный предел текучести

Из изложенного можно сделать вывод, что пластичность - это положительное свойство материала. Она играет большую роль в обеспечении безопасности и надежности строительных конструкций. Чем длительнее развитие пластических деформаций, тем больше предел несущей способности (начало пластического деформирования) отдален от предела прочности (фактического разрушения материала).

Вследствие больших значений пластических деформаций, в десятки и сотни раз превышающих упругие, их развитие в перенапряженных элементах сложных конструкций приводит перераспределению и выравниванию усилий за счет догрузки менее напряженных элементов. Тем самым повышается работоспособность конструкций в целом по сравнению расчетными пределами.

Таким образом, работа материала в пластической стадии представляет огромный резерв прочности, благодаря которому конструкция, как правило, не разрушается, а теряет несущую способность из-за больших остаточных деформаций.

5. ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Совсем иначе ведут себя при растяжении хрупкие материалы, к которым относятся чугун, высокоуглеродистая (инструментальная) сталь, стекло, каменные строительные материалы (кирпич, бетон и проч.).

Хрупкостью называется свойство материала, противоположное пластичности, то есть склонность к разрушению при весьма незначительных остаточных деформациях.

Хрупкое разрушение принципиально отличается от вязкого. Оно является следствием чрезмерного развития упругих деформаций при отсутствии или затрудненности пластических. На диаграмме растяжения хрупкого материала (рис. 10) отклонение от закона Гука наблюдается уже в начальной стадии нагружения и модуль упругости E не является постоянной величиной.

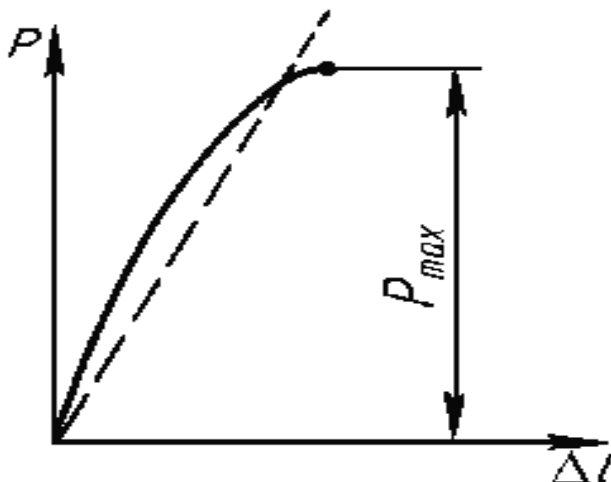


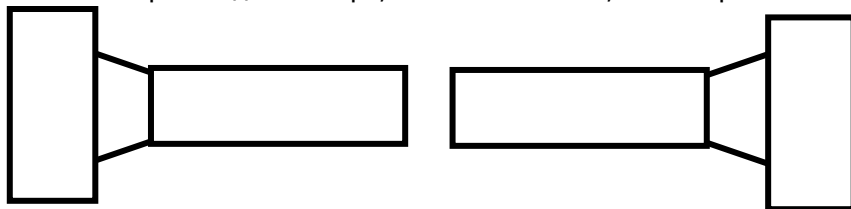
Рис. 10. Диаграмма растяжения хрупкого материала

Однако в пределах тех напряжений, при которых материал обычно работает в сооружениях, наблюдающиеся отклонения от закона Гука незначительны. Поэтому при практических расчетах заменяют криволинейную часть диаграммы соответствующей хор-

дой и считают модуль упругости материала **E** постоянным.

Это тем более допустимо потому, что механические характеристики хрупких материалов изменяются для отдельных образцов в более широких пределах, чем характеристики пластичных материалов. Поэтому нет смысла пользоваться более точными выражениями зависимости между напряжениями и деформациями.

Хрупкие материалы, как правило, плохо сопротивляются растяжению. Опасность хрупкого разрушения заключается в том, что оно происходит быстро, почти внезапно, без образования



шейки (рис. 11).

Рис. 11. Разрушение образца из хрупкого материала

За характеристику прочности хрупких материалов принимается отношение наибольшего значения растягивающей силы **P_{max}**, соответствующей моменту разрыва образца, к начальной площади его поперечного сечения **A₀**. Это отношение называется **пределом прочности $\sigma_{пч}$** или **временным сопротивлением $\sigma_{в}$** и вычисляется по формуле

$$\sigma_{пч} = \frac{P_{max}}{A_0}.$$

6. ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ПРИ СЖАТИИ ПЛАСТИЧНЫХ И ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ. ДИАГРАММА СЖАТИЯ

При изучении физико-механических свойств различных материалов образцы испытываются не только на растяжение, но и на сжатие. Особенно важное значение имеют испытания на сжатие хрупких материалов.

Свойства материалов при сжатии изучают на образцах кубической или цилиндрической форм. Цилиндрическая форма образца характерна для металлов и сплавов, при этом отношение высоты цилиндра к его диаметру должно быть не более 3-х.

Обычно испытываются образцы, у которых $h_0 = d_0 = 20\text{мм}$ (рис. 12).

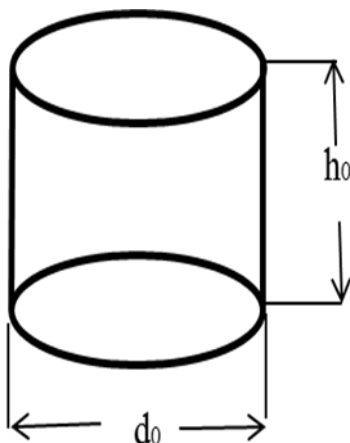


Рис. 12. Образец для испытания на сжатие металлов и сплавов

Испытание на сжатие пластичных материалов, несмотря на простоту, менее распространено, чем испытание на растяжение. Объясняется это, прежде всего тем, что в упругой стадии и при малом развитии пластических деформаций диаграмма сжатия таких материалов, как например, низкоуглеродистая сталь, почти полностью повторяет диаграмму растяжения и не дает ни каких новых механических характеристик (рис. 13)

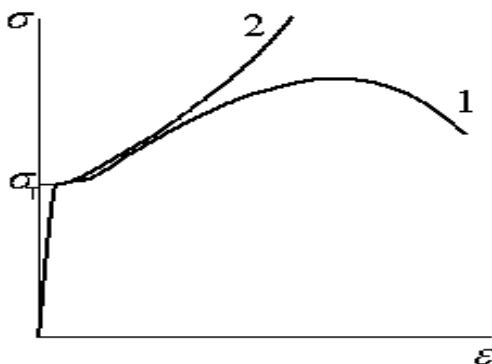


Рис. 13. Диаграммы напряжений пластичного материала
На этом рисунке

1 - при растяжении; (2) – при сжатии.

Пределы пропорциональности, упругости и текучести имеют практически одни и те же значения, что при растяжении, что при сжатии. Углы наклона прямолинейных участков обеих диаграмм одинаковы, следовательно, одинаковы и модули упругости **E**.

Различия начинаются после наступления текучести, то есть за пределами эксплуатационной способности большинства строительных конструкций. Площадка текучести при сжатии менее выражена, чем при растяжении. При больших деформациях различие становится особенно ощутимым из-за того, что сжатие сопровождается увеличением площади поперечного сечения образца, вследствие чего испытание требует постоянно возрастающей нагрузки.

Следовательно, при сжатии пластичного материала получить такую характеристику, как предел прочности, не представляется возможным.

Испытываемый образец сначала принимает бочкообразную форму, а затем, не разрушаясь, сплющивается в тонкий диск (рис. 14)

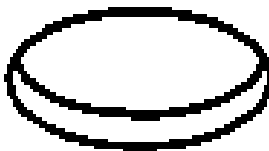


Рис. 14. Деформация образца из пластичного материала при сжатии

В расчетной практике предел прочности на сжатие условно принимают таким же, как и на растяжение

$$\sigma_{пч}^с = \sigma_{пч}^р.$$

По этим причинам пластичные материалы на сжатие практически не испытывают. Исключение составляют волокнистые материалы, к которым относится древесина, являющаяся, как известно, анизотропным материалом.

Прочностные характеристики древесины существенно зависят от направления волокон по отношению к прикладываемой нагрузке. Испытание на сжатие древесины производится на образцах в виде кубиков, прикладывая нагрузку в двух направлениях, вдоль волокон и поперек волокон.

Диаграмма соответствующих испытаний представлена на рис. 15.



Рис. 15. Диаграмма сжатия деревянных образцов

Как видно из диаграммы, древесина гораздо лучше сопротивляется сжатию при направлении усилия вдоль волокон.

Характер разрушения деревянных образцов также зависит от направления волокон. Так, при сжатии образца нагрузкой, действующей вдоль волокон, происходит скалывание от действия касательных напряжений. Если же образец сжимается поперек волокон, то происходит его смятие (рис. 16)

а)

б)

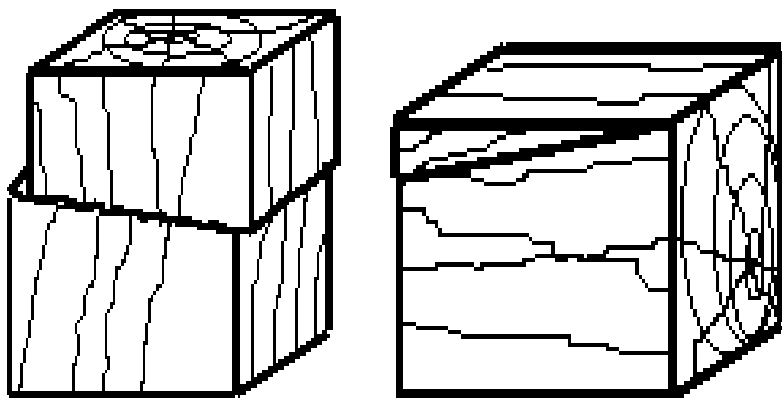


Рис. 16. Вид разрушения деревянных образцов при сжатии

На этом рисунке

а) – вдоль волокон; б) – поперек волокон.

Для хрупких материалов, таких, как чугун, бетон и другие каменные материалы, испытание на сжатие является основным. Образцы из этих материалов доводят до разрушения, а предел прочности устанавливают, как при растяжении

$$\sigma_{пч} = F_{пч} / A_0.$$

Диаграмма сжатия хрупкого материала по виду напоминает диаграмму растяжения, но сопротивление сжатию у хрупких материалов в несколько раз больше, чем растяжению (рис. 17).

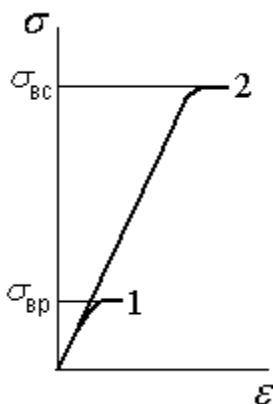


Рис.17. Диаграмма испытаний хрупкого материала

На этом рисунке

1 – на растяжение; 2 – на сжатие.

Разрушение при сжатии хрупкого материала происходит обычно путем сдвига одной части образца относительно другой. Так, в чугунном образце плоскость сдвига наклонена примерно под углом **45°**, то есть сдвиг происходит по, так называемым, площадкам сдвига, где возникают наибольшие касательные напряжения (рис. 18).



Рис. 18. Разрушение чугунного образца при сжатии.

Испытание на сжатие такого строительного материала как бетон производят на образцах в виде кубиков со сторонами ребер **100, 150, 200** или 300мм., в зависимости от особенности технических возможностей эксперимента.

Характер разрушения бетонного образца показан на рис. 19

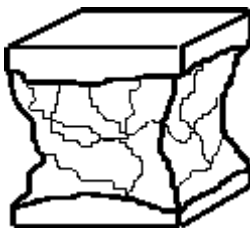


Рис. 19. Разрушение бетонного кубика при сжатии без смазки опорных поверхностей.

Появления трещин бетона с боков кубика по площадкам, наклоненным под углом около **45°**, приводит к выкалыванию бетона по боковым поверхностям кубика. В результате этого кубический образец принимает вид двух усеченных пирамид, соприкасающихся меньшими основаниями. Такой характер разрушения бетонного кубика объясняется наличием сил трения между подушками прессы и опорными поверхностями образца. Если уменьшить влияние этих сил путем смазки, то возникнут продольные трещины по площадкам параллельным направлению сжатия. При этом образец разрушится при меньшей нагрузке, чем при испытании без смазки (рис. 20).

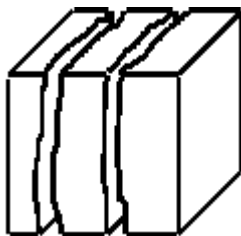


Рис. 20. Разрушение бетонного кубика при сжатии со смазкой опорных поверхностей

Следует отметить, что для бетона стандартным считается испытание без смазки трущихся поверхностей.

7. ДОПУСКАЕМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Одной из важнейших механических характеристик материала, определяемых по результатам испытаний на растяжение и сжатие, является допускаемое напряжение $[\sigma]$, которое представляет собой критерий прочности материала. Наибольшие напряжения, фактически возникающие в конструкции, не должны превышать некоторой допускаемой величины. При этом допускаемое напряжение должно быть таким, чтобы конструкция работала не на пределе своих возможностей, а с определенным запасом прочности. Поэтому допускаемое напряжение для материала определяют путем деления предельного (опасного) напряжения σ_0 на коэффициент запаса n , то есть

$$[\sigma] = \frac{\sigma_0}{n},$$

где

σ_0 – опасное, напряжение;

n – коэффициент запаса прочности, показывающий, во сколько раз допускаемое напряжение меньше опасного.

Значение коэффициента запаса прочности зависит от многих факторов, из которых основными являются:

- состояние материала (хрупкое или пластичное);
- характер приложения нагрузки (статическая, динамическая или повторно-переменная);
- неоднородность материала;
- неточность задания величин внешних нагрузок;
- приближенность рас- четных схем и некоторая при-

близенность расчетных формул;

– долговечность и значимость конструкции.

Эксперимент показывает, что для пластичных и хрупких материалов момент перехода в предельное состояние принципиально отличается. Для пластичных и хрупкопластичных материалов в качестве предельного (опасного) напряжения принимают не разрушающее напряжение, а предел текучести ($\sigma_0 = \sigma_T$ или $\sigma_0 = \sigma_{0,2}$), так как при достижении его в материале появляются большие остаточные деформации. При этом существенно меняются размеры, а нередко и форма элементов конструкции, что приводит к нарушению ее нормальной работы в целом. Особенно это относится к деталям машин. Таким образом, для пластичных материалов при статическом нагружении, допускаемое напряжение вычисляется по формуле

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}$$

где

n_T – коэффициент запаса прочности по пределу текучести.

На основании длительной практики конструирования для сталей при статической нагрузке принимается $n_T = 1,4 \div 1,6$.

У хрупких материалов текучесть отсутствует и в качестве опасного напряжения для них принимают предел прочности ($\sigma_0 = \sigma_{пч}$) или временное сопротивление ($\sigma_0 = \sigma_B$), после достижения которого материал разрушается.

Для хрупких материалов при статических нагрузках

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{n_B}$$

где

n_B – коэффициент запаса по пределу прочности.

Этот коэффициент принимается обычно в пределах $n_B = 2,5 \div 3,0$.

Допускаемые напряжения $[\sigma]$, получаемые по выше приведенным формулам, называют обычно **основными допускаемыми** напряжениями.

Иногда допускаемые напряжения на растяжение обозначают через $[\sigma]_p$, а на сжатие – через $[\sigma]_c$.

Хрупкие материалы обычно лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению, и для них

$$[\sigma]_c > [\sigma]_p.$$

Для сталей и большинства других пластичных материалов можно принять

$$[\sigma]_p = [\sigma]_c$$

и обозначать допускаемые напряжения в таком случае через $[\sigma]$ без индекса.

Для анизотропного материала, такого как древесина, при определении прочностных характеристик устанавливают два значения допускаемого напряжения: $[\tau_{ск}]$ – допускаемое напряжение на скалывание вдоль волокон и $[\sigma_{см}]$ – допускаемое напряжение на смятие поперек волокон.

От правильного выбора величины допускаемых напряжений зависит, с одной стороны, прочностная надежность проектируемой конструкции, а с другой – ее экономичность (количество затрачиваемого материала).

Значения допускаемых напряжений и коэффициентов запаса устанавливаются для строительных конструкций – строительными нормами и правилами (СНиП), для машиностроительных – внутриотраслевыми заводскими нормами (ТУ).

8. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНЫХ И ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Изучение диаграмм растяжения и сжатия пластичных и хрупких материалов, а также характера разрушения образцов из этих материалов, позволяет произвести сравнительный анализ механических свойств пластичных и хрупких материалов.

1. Основное различие состоит в том, что хрупкие материалы разрушаются в упругой стадии работы, при сравнительно малых деформациях, в то время как пластичные материалы перед разрушением испытывают значительное остаточное деформирование и формоизменение.

2. Как известно, площадь под диаграммой растяжения характеризует полную работу, затрачиваемую на доведения образца до разрыва. Из сопоставления диаграмм растяжения пластичного и хрупкого материала видно, что для разрушения образца из пластичного материала необходимо затратить значительно большую работу, чем для разрушения образца из хрупкого материала. Следовательно, если конструкция предназначена для восприятия динамических нагрузок, которые, как правило, сопровождаются выделением большого количества кинетической энергии, предпочтение должно отдаваться пластичному материалу.

Хрупкие материалы легко и быстро разрушаются от воздействия ударных нагрузок, вследствие недостаточной своей энергоемкости.

С другой стороны, при статическом нагружении те же хрупкие материалы вполне работоспособны и надежны благодаря незначительному деформированию даже при напряжениях близких к пределу прочности.

3. Пластичные материалы, как правило, одинаково хорошо работают как на растяжение, так и на сжатие. Большинство же хрупких материалов сопротивляется растяжению значительно хуже, чем сжатию (см. таблицу 1).

Механические характеристики некоторых строительных материалов
Табл. 1.

Материал	Предел прочности МПа		Предел текучести σ_T ($\sigma_{0.2}$) МПа	Относит. остаточное удлинение $\epsilon_{ост}$, %	Относит. поперечное сужение ψ , %
	При растяжении $\sigma_{пч}^P$	При сжатии $\sigma_{пч}^C$			
Низкоуглеродистая сталь марки Ст.3	345÷390	-	215÷255	23÷27	60÷70
Низколегированные стали марок 09Г2С, 19Г2С1, 12Г2, 15ХСНД	430÷520	-	265÷310	21	-
Дюралюминий Д16	230÷465	-	100÷350	8÷13	30÷45
Бетон	0.14÷2.5	0.95÷43	-	-	-
Кирпич	0.7÷3	7.5÷100	-	-	-



Древесина (сосна, ель) вдоль волокон	25÷34	20÷33	-	-	-
Стекло	30÷90	500÷2000	-	-	-

Это обстоятельство в значительной мере ограничивает применение хрупких материалов или требует специальных мероприятий по их усилению при работе на растяжение.

Таким образом, у пластичных и хрупких материалов обнаруживаются резко отличающиеся свойства при работе как на растяжение, так и на сжатие. Тем не менее, деление материалов на пластичные и хрупкие является довольно относительным. В зависимости от условий испытания и работы пластичный материал может проявлять склонность к хрупкому разрушению и, наоборот, хрупкий материал может приобрести пластичные свойства. Например, камень и бетон, являющиеся при осевом сжатии типично хрупким материалом, при всестороннем сжатии деформируется пластически.

Существенное влияние на проявление механических свойств материала оказывает продолжительность нагружения и температурное воздействие.

При быстром нагружении более резко проявляется склонность к хрупкому разрушению. При действии нагрузки в течение длительного времени у хрупких материалов проявляются пластические свойства, например, усадка бетона. Или же хрупкое стекло в условиях значительного нагружения, даже при обычной температуре, способно испытывать остаточную деформацию.

Изменение температурного режима испытаний и условий работы материалов также приводит к изменению их механических характеристик. Такой материал, как низкоуглеродистая сталь, при температуре **300÷330°C** проявляет склонность к хрупкому разрушению, а при температуре **600÷650°C** наступает температурная пластичность и несущая способность стали практически исчерпывается.

Отрицательные температуры несколько повышают прочность стали, но увеличивают ее хрупкость. Так, при температуре ниже **-10°C** пластические свойства начинают заметно ухудшаться, а при температуре ниже **-45°C** низкоуглеродистая сталь становится хрупкой.

Немалый практический интерес представляет такое свойство сталей, обладающих текучестью, как **наклеп**, при котором повышаются упругие свойства материала.

Наклеп при растяжении элементов строительных конструкций следует считать явлением отрицательным, вследствие снижения пластических свойств стали.

Однако, в некоторых случаях, когда уменьшение удлинения

не имеет столь большого значения, наклеп используется для повышения прочностных характеристик.

Таким способом иногда укрепляют арматуру железобетонных конструкций. К наклепу прибегают и тогда, когда необходимо снизить деформативность элементов. Например, стальные тросы грузоподъемных механизмов в процессе эксплуатации вытягиваются и могут не помещаться на барабанах и блоках. Во избежание этого проволоку тросов подвергают предварительной вытяжке за предел текучести. Аналогично поступают с проводами электрической связи для предотвращения или уменьшения провисания под действием собственного веса и гололеда.

Таким образом, рассмотренные выше явления свидетельствуют о том, что один и тот же материал при различных обстоятельствах может проявлять диаметрально противоположные свойства. Следовательно, правильнее будет говорить не о пластичных и хрупких материалах, а о пластичном и хрупком состоянии (или разрушении) материалов в определенных условиях нагружения или работы. Тем не менее, термины «пластичный» и «хрупкий» часто применяются в курсах сопротивления материалов, но понимать их следует с учетом сказанного выше.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое «Механические испытания материалов» и какие цели они преследуют?
2. Какие основные требования предъявляются к образцам и порядку испытания их на растяжение?
3. Как выглядит диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали и какие характерные точки выделяются на ней?
4. Дайте определение механических характеристик прочности материала. Как вычисляются эти характеристики?
5. Дайте определение механических характеристик пластичности материала. Как вычисляются эти характеристики?
6. Дайте определение упругих и пластических деформаций материала.
7. Какая особенность наблюдается при разрушении образцов из пластичных сталей при растяжении? Как называется такое разрушение?
8. Что такое диаграмма напряжений и как она строится?
9. В чем заключается условность диаграммы напряжений и как выглядит истинная диаграмма напряжений пластичного материала при растяжении?

10. Как определяются характеристики прочности пластичного материала, не имеющего площадки текучести? Что такое условный предел текучести?
11. Особенность работы хрупкого материала на растяжение. Диаграмма растяжения хрупких материалов.
12. Что такое хрупкое разрушение и в чем его опасность?
13. В чем заключается особенность работы пластичного материала при испытании его на сжатие?
14. В чем состоит особенность работы пластичного материала при испытании его на сжатие?
15. Диаграмма сжатия пластичного материала.
16. Диаграмма сжатия хрупкого материала.
17. Особенности разрушения образцов из хрупкого материала (чугуна, бетона) при сжатии.
18. Как устанавливаются допускаемые напряжения для пластичных и хрупких материалов?
19. Назовите основные отличия работы пластичных и хрупких материалов.
20. Как влияют различные факторы (вид и скорость нагружения, температурные режимы, длительность действия нагрузки и т.д.) на механические характеристики пластичных и хрупких материалов?
21. Что такое наклеп? Практическое его использование.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 608с.
2. Михайлов А.М. Соппротивление материалов. – М.: Стройиздат, 1989. – 352с.
3. А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. Соппротивление материалов: Учебник для вузов. – 3-е изд., исправл. – М: Высшая школа, М. 2003. – 560 с.
4. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов: Учебник для вузов. – 9-е изд., перераб. – М.: Наука. 1986. – 512с.
5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по соппротивлению материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736с.