

Министерство образования Красноярского края  
краевое государственное бюджетное  
профессиональное образовательное учреждение  
«Красноярский аграрный техникум»

РАССМОТРЕНО:

на заседании цикловой  
комиссии технических дисциплин  
протокол №\_\_  
«\_\_»\_\_\_\_\_2020 г.

Председатель цикловой комиссии  
\_\_\_\_\_ Ю.А. Корчанова

УТВЕРЖДАЮ:

зам. директора по УР  
Красноярского аграрного техникума  
\_\_\_\_\_ Т. М. Тимофеева  
«\_\_\_\_»\_\_\_\_\_2019 г.

**Методическое пособие для выполнения дистанционных работ по  
дисциплине: «Техническая механика»**

Курс II

Специальность «Техническое обслуживание и ремонт автомобильного  
транспорта»

Составил: Л.В. Иванцова

Красноярск 2020

## **Методические указания**

При изучении данной темы необходимо ознакомиться с понятиями усталости, выносливости материала, коэффициентом концентрации напряжений, динамическим коэффициентом. Следует иметь представление о приближенном способе расчета на удар.

Оформить конспект и ответить на вопросы.

## **Содержание учебного материала**

Циклы напряжений. Усталостное разрушение, его причины и характер. Кривая усталости, предел выносливости. Понятие о динамических нагрузках. Силы инерции при расчете на прочность. Динамическое напряжение, динамический коэффициент.

## Занятие № 58

### Динамическое напряжение: Понятие о динамическом напряжении и методах его определения.

#### Расчет на прочность при действии ударной нагрузки

Понятие об ударной нагрузке. Определение динамических напряжений и перемещений при ударе.

#### Понятие об ударной нагрузке

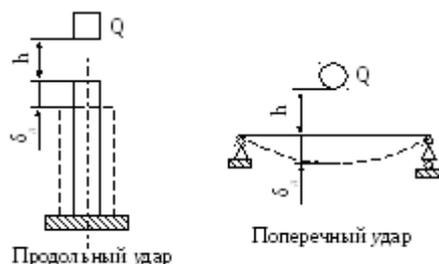


Рис. 9.1

Ударом называется взаимодействие неподвижной конструкции с движущимся телом. Например, ударное воздействие испытывает конструкция, на которую с высоты  $h$  падает груз весом  $Q$  (рис. 9.1).

После удара происходит торможение груза конструкцией и через некоторый промежуток времени скорость груза становится равной нулю. В этот момент времени напряжения и перемещения в конструкции имеют максимальные значения и называются динамическими. Затем происходят затухающие колебания системы «конструкция-груз» и устанавливается состояние статического равновесия. Напряжения и перемещения в конструкции становятся равными тем значениям, которые имеют место при статическом приложении силы  $Q$ . Основной задачей расчета на удар является определение динамических напряжений и перемещений.

#### Определение динамических напряжений и перемещений при ударе

При определении динамических напряжений и перемещений используются следующие допущения

1. удар является неупругим, т.е. груз не отскакивает от конструкции, а перемещается вместе с ней;
2. в процессе удара выполняется закон Гука;
3. изменение температуры системы «конструкция-груз» является незначительным и им можно пренебречь;
4. вес конструкции является малым и его можно не учитывать.

Для определения динамических параметров конструкции используем закон сохранения механической энергии. Согласно этому закону в процессе удара потенциальная энергия груза преобразуется в потенциальную энергию деформации конструкции

$$U_{\text{п}} = U_{\text{к}} \quad (9.1)$$

Потенциальная энергия груза равна работе, совершаемой силой  $Q$  до полной остановки груза

$$U_{\text{п}} = Q(h + \delta_{\text{д}}), \quad (9.2)$$

где  $h$  – высота падения груза;  $\delta_{\text{д}}$  – динамическое перемещение точки приложения силы  $Q$ .

Потенциальную энергию деформации конструкции найдем как работу статически приложенной динамической силы  $Q_{\text{д}}$  на динамическом перемещении  $\delta_{\text{д}}$

$$U_{\text{к}} = \frac{1}{2} Q_{\text{д}} \delta_{\text{д}} \quad (9.3)$$

Динамическая сила  $Q_{\text{д}}$  равна сумме силы  $Q$  и силы инерции, возникающей в результате торможения груза конструкцией.

Из формул (9.1) – (9.3) следует

$$Q(h + \delta_d) = \frac{1}{2} Q_d \delta_d. \quad (9.4)$$

В области действия закона Гука между силами и соответствующими им перемещениями существует прямая пропорциональность. Поэтому

$$Q = k\delta; \quad Q_d = k\delta_d. \quad (9.5)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Используя (9.4) и (9.5), получаем уравнение для определения динамического перемещения

$$\delta_d^2 - 2\delta\delta_d - 2\delta h = 0. \quad (9.6)$$

Решая (9.6), находим

$$\delta_d = \delta \pm \sqrt{\delta^2 + 2\delta h}. \quad (9.10)$$

Так как динамическое перемещение не может быть меньше статического перемещения, то в соотношении (9.10) оставляем знак плюс. Окончательно будем иметь

$$\delta_d = \delta + \sqrt{\delta^2 + 2\delta h} = k_d \delta, \quad (9.11)$$

где

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta}} \quad (9.12)$$

– динамический коэффициент.

В зоне действия закона Гука между перемещениями и напряжениями существует прямо пропорциональная зависимость. Поэтому

$$\sigma_d = k_d \sigma. \quad (9.13)$$

Таким образом, согласно формулам (9.11) и (9.13) динамическое напряжения (перемещение) при ударе равно произведению напряжения (перемещения), возникающего в конструкции при статическом приложении силы  $Q$ , на динамический коэффициент.

Рассмотрим частные случаи.

1. Если  $h \gg \delta$ , то из (9.12) следует, что с достаточной степенью точности динамический коэффициент можно вычислять по приближенной формуле

$$k_d = \sqrt{\frac{2h}{\delta}}.$$

2. При мгновенном приложении нагрузки ( $h = 0$ )  $k_d = 2$ .

Из зависимости (9.12) видно, что для уменьшения значений динамических параметров нужно уменьшать жесткость (увеличивать податливость) конструкции. Этого можно достичь, например, за счет использования в конструкции пружин или рессор (рис. 9.2).

3



Рис. 9.2

## Занятие № 59

### Изучение явления «Наклеп».

Характеризуется повышением предела пропорциональности и снижением пластичности металла при повторных нагружениях.

Если при испытании на растяжение стальной образец разгрузить не доводя до разрушения (точка М на рис.1), то в процессе разгрузки зависимость между силой  $F$  и удлинением  $\Delta l$  изобразится прямой MN. Опыт показывает, что эта прямая параллельна прямой OA. При разгрузке деформация полностью не исчезает. Она уменьшается на величину упругой части удлинения (отрезок равный  $\Delta l_y$ ).

Отрезок ON диаграммы растяжения представляет собой остаточное удлинение (отрезок равный  $\Delta l_{ост}$ ). Его называют также пластическим удлинением, а соответствующую ему деформацию – пластической деформацией. Таким образом,

$$\Delta l = \Delta l_y + \Delta l_{ост}$$

Соответственно

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{ост}$$

Если образец был нагружен в пределах участка OA и затем разгружен, то удлинение будет чисто упругим, и  $\Delta l_{ост}=0$ .

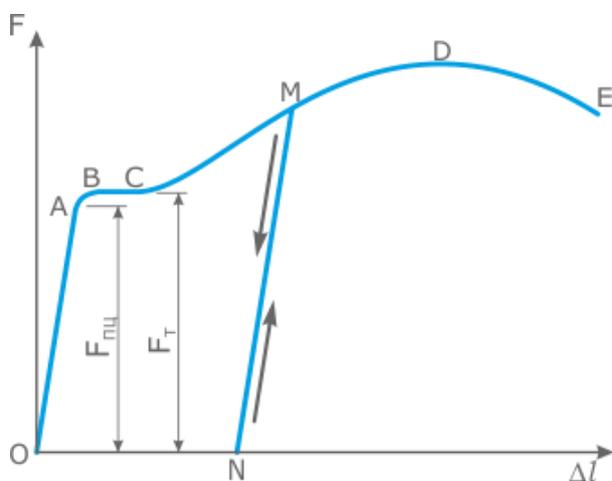


Рис. 1

При повторном нагружении образца диаграмма возвращается по прямой NM и далее проходит по кривой MDE (рис. 1) так, как будто промежуточной разгрузки и не было.

Следовательно, при повторных нагружениях образца, предварительно растянутого до возникновения в нём напряжений, больше предела текучести, предел пропорциональности повышается до того уровня, которого достигли напряжения при предшествующей нагрузке. Если между разгрузкой и повторным нагружением был перерыв, то предел пропорциональности повышается ещё больше.

Следует отметить, что диаграмма NMDE, получаемая при повторном нагружении, не имеет площадки текучести, поэтому для образца, претерпевшего разгрузку и повторное нагружение, определяется условный предел текучести ( $\sigma_{0.2}$ ), который, очевидно, выше предела текучести при первичном нагружении.

Наклёп во многих случаях является нежелательным явлением, так как наклёпанный материал становится более хрупким. Поэтому наклёп часто снимают отжигом – нагревом до определённой температуры.

В целом ряде случаев наклёп полезен и его создают искусственно, например, в деталях, подвергающихся воздействию переменных нагрузок и при производстве арматуры.

### ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЙ

Диаграмма напряжений показывает основные механические характеристики материалов (в основном металлов).

Для построения диаграммы используют диаграмму растяжения испытуемого образца, изготовленного из материала, характеристики которого требуется изучить.

После эксперимента по испытанию на растяжение, на полученной диаграмме  $F-\Delta l$  отмечаются несколько характерных точек, в которых определяются значения растягивающих усилий  $F$  и соответствующие им абсолютные деформации  $\Delta l$ .

Далее для полученных значений точек диаграммы определяются соответствующие им нормальные напряжения  $\sigma$ , по формуле:

$$\sigma_i = F_i / A_0$$

где:  $F_i$  — значение растягивающей силы в характерной точке диаграммы;  $A_0$  — площадь поперечного сечения рабочей части образца, и относительные деформации  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_i = \Delta l / l_0$$

где  $l_0$  — начальная длина рабочей части испытуемого образца.

Затем по полученным данным в системе координат  $\sigma$ - $\varepsilon$  строится диаграмма напряжений (рис. 1)

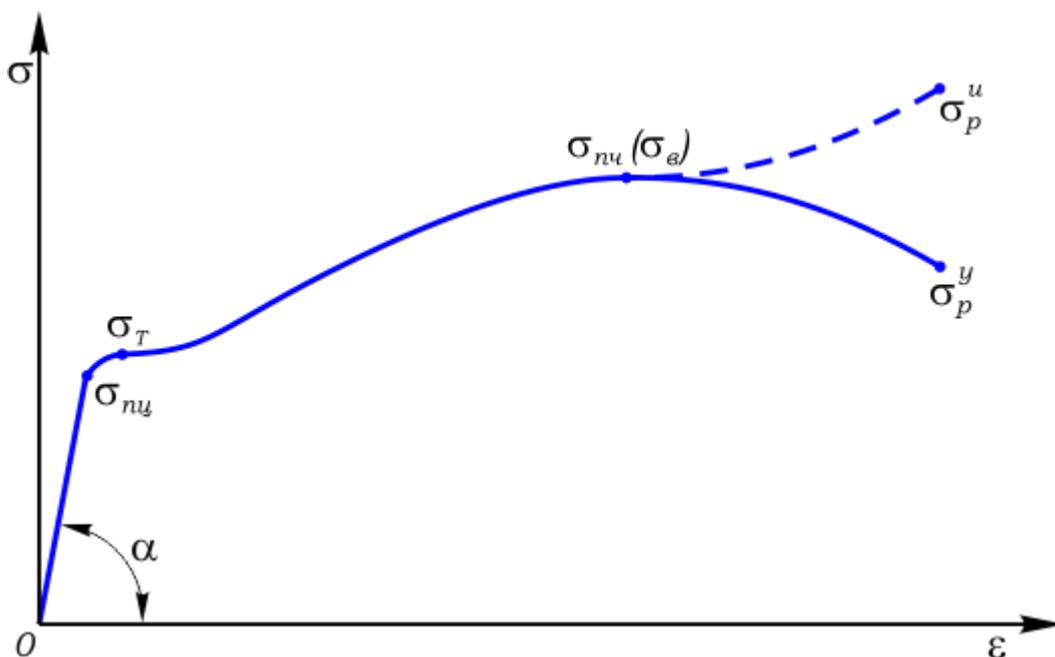


Рис. 1 Условная и истинная диаграмма напряжений для малоуглеродистой стали

По этой диаграмме определяются следующие механические характеристики материала:

$\sigma_{nc}$  — предел пропорциональности

Определяется как крайняя верхняя точка начального прямолинейного участка диаграммы.

$$\sigma_{nc} = F_{nc} / A_0$$

$\sigma_T$  — предел текучести

Точка после которой линия диаграммы некоторое время движется параллельно оси деформаций  $\varepsilon$ .

Практически горизонтальный участок диаграммы, следующий за пределом текучести называется *площадкой текучести*.

$$\sigma_T = F_T / A_0$$

$\sigma_{пч}$  — предел прочности ( $\sigma_b$  — временное сопротивление)

Высшая точка условной диаграммы;

$$\sigma_{пч} = F_{max} / A_0$$

$\sigma_p$  — напряжение в момент разрыва образца ( $\sigma_p^y$  — условное и  $\sigma_p^u$  — истинное).

Конечная точка диаграммы, при которой происходит разрыв образца.

- условное напряжение в момент разрыва

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

- истинное напряжение при разрыве

$$\sigma_p^u = F_p / A_u$$

здесь  $A_u$  — площадь поперечного сечения в области «шейки» образца.

При более тонких испытаниях по данной диаграмме можно определить предел упругости стали.

На рисунке 1 штриховой линией показан фрагмент истинной диаграммы напряжений. Возрастание напряжений после прохождения предела прочности объясняется тем, что в этот момент в рабочей части образца образуется локальное утоньшение («шейка») уменьшающая его площадь поперечного сечения  $A$ , что в свою очередь приводит к увеличению напряжений при уменьшающейся величине растягивающей силы.

Кроме того, по диаграмме напряжений можно приближенно определить величину модуля упругости  $E$  рода материала образца:

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

он определяется как отношение напряжений и относительных деформаций, для любой точки диаграммы, расположенной от ее начала до предела пропорциональности, либо как тангенс угла наклона начального участка диаграммы к оси  $\varepsilon$ .

## УПРУГИЕ И ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

*Упругими* называют деформации, исчезающие после снятия вызвавшей их нагрузки.

Это, как правило, весьма незначительные деформации, возникающие при напряжениях, не превышающих значения предела пропорциональности (упругости).

*Остаточные* (пластические) – часть полных деформаций, не исчезающая после разгрузки элемента.

Указанные деформации наиболее наглядно можно показать на диаграмме растяжения стального образца (рис. 1)

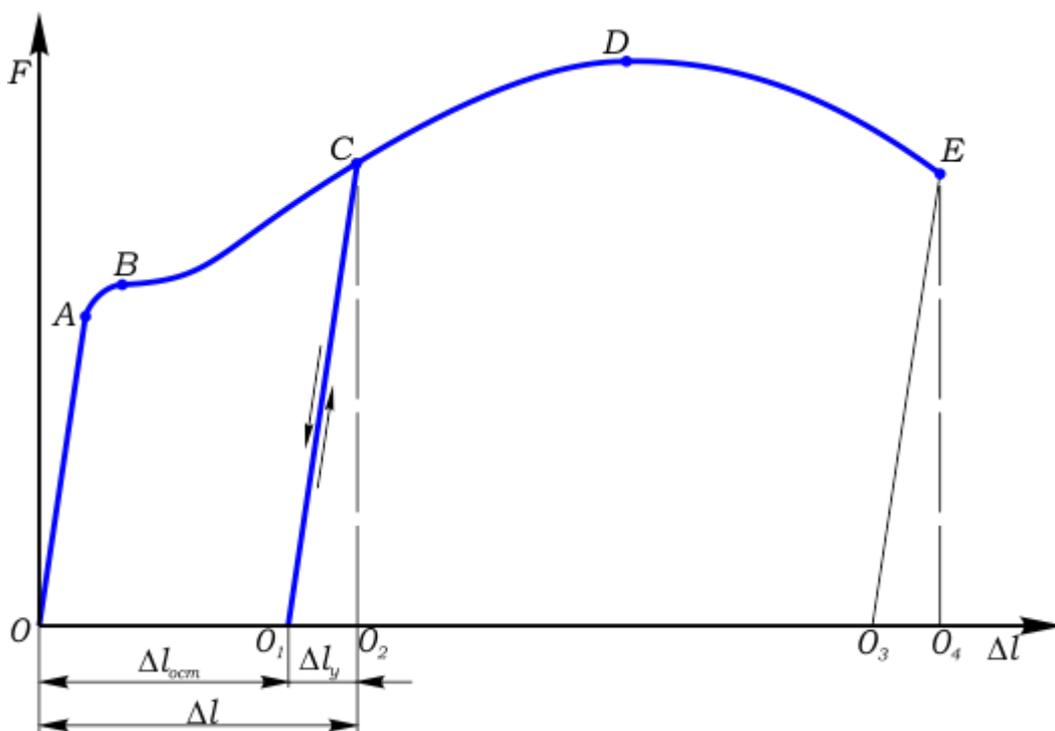


Рис. 1 Упругие и остаточные деформации на диаграмме растяжения

Если при растяжении стального образца начать его разгружение в любой момент до достижения предела пропорциональности (точка  $A$  диаграммы), то линия диаграммы при этом будет возвращаться по той же траектории что и при нагружении, и при полном снятии нагрузки вернется в первоначальное положение  $O$ , деформации  $\Delta l$  при этом станут нулевыми.

Это говорит о том, что все деформации стержня до точки  $A$  диаграммы, являются упругими.

Но если разгружение образца начать в любой другой момент после прохождения т.  $A$ , например из точки  $C$  (рис. 1) то диаграмма разгружения будет иметь вид прямой линии, параллельной начальному участку диаграммы  $OA$ .

Как видно из рисунка, в точке  $C$ , до начала разгружения, полные деформации  $\Delta l$  равны длине отрезка  $OO_2$ . После снятия нагрузки (когда  $F=0$ ) упругая составляющая  $\Delta l_y$  полных деформаций  $O_1O_2$  исчезает, а отрезок  $OO_1$  показывает величину остаточных деформаций стержня  $\Delta l_{ост}$ .

При разрушении образца, непосредственно перед разрывом  $OO_4$  – полная деформация  $\Delta l$ .

Упругие деформации  $\Delta l_y$  —  $O_3O_4$  исчезают сразу после разрыва, и остаются только  $\Delta l_{ост}$  пластические (остаточные)  $OO_3$ .

## ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ

Пределом текучести называют механическую характеристику материала, характеризующую напряжение, при котором деформации продолжают расти без увеличения нагрузки.

Обозначение  $\sigma_T$

Единица измерения – Паскаль [Па] либо кратные [МПа].

На диаграмме напряжений (рис. 1) обозначается точкой, в которой начинается практически горизонтальный участок диаграммы, называемый площадкой текучести.

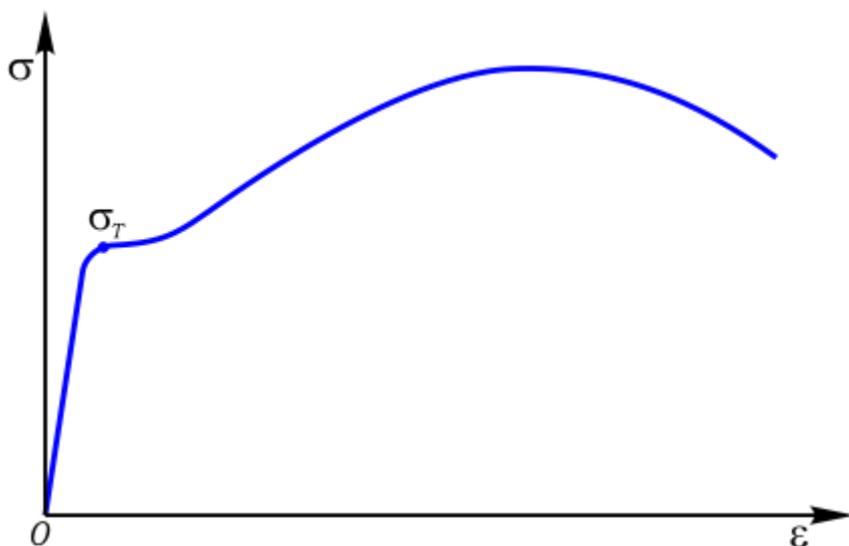


Рис. 1. Предел текучести

Это важный параметр, с помощью которого рассчитываются допустимые напряжения для пластичных материалов.

После прохождения предела текучести в металле образца начинают происходить необратимые изменения, перестраивается кристаллическая решетка металла, появляются значительные пластические деформации. При этом металл самоупрочняется, об этом говорит то, что после площадки текучести деформации растут при возрастающем значении растягивающей силы.

#### Условный предел текучести

В случаях, когда на диаграмме напряжений нет выраженной площадки текучести, определяют так называемый *условный предел текучести*  $\sigma_{0,2}$ . Это величина напряжений, при которых относительные остаточные деформации равны 0,2%.

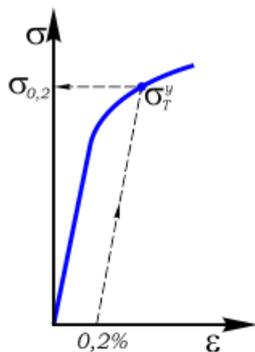


Рис. 2. Условный предел текучести

Для его определения (рис. 2) вдоль оси  $\varepsilon$  откладывается значение равное 0,2%, откуда проводится луч параллельный начальному участку диаграммы напряжений.

Точка пересечения луча с линией диаграммы есть условный предел текучести для данного материала.

## ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ

Пределом прочности называют характеристику материала указывающую величину механических напряжений соответствующую максимальному значению нагрузки при испытаниях на растяжение.

Обозначение —  $\sigma_{нч}$

Размерность — Паскаль [Па], либо кратные значения [МПа].

Синоним предела прочности — временное сопротивление ( $\sigma_{\sigma}$ ).

Определяется экспериментально, как наивысшая точка условной диаграммы напряжений (рис. 1).

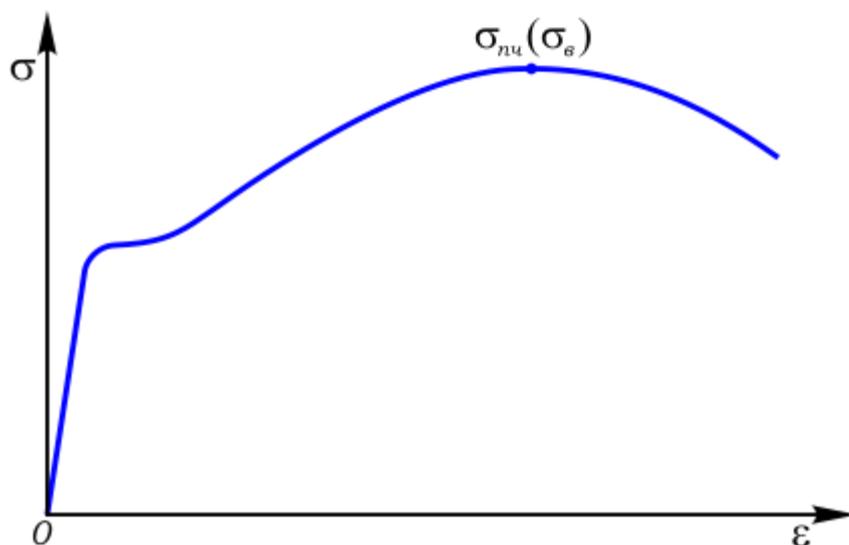


Рис. 1. Предел прочности на диаграмме напряжений

Либо по диаграмме растяжения как отношение максимальной продольной силы  $F_{max}$  к начальной площади  $A_0$  поперечного сечения испытуемого образца:

$$\sigma_{нч} = F_{max} / A_0$$

Предел прочности является предельным напряжением при расчете допустимых напряжений для *хрупких* материалов.

### ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ

Пределом упругости называют механическую характеристику материала, показывающую максимальное значение напряжения, при котором в элементах конструкций не возникает остаточных деформаций (т.е. имеют место только упругие деформации).

На практике за него принимают величину напряжений, при которых остаточные деформации не превышают 0,05%.

Обозначается  $\sigma_y$  или  $\sigma_{0,05}$

Единица измерения Паскаль [Па] либо кратные [МПа].

На диаграмме напряжений предел упругости располагается очень близко к пределу пропорциональности и по сравнению с остальными характеристиками определяется при более точных испытаниях.

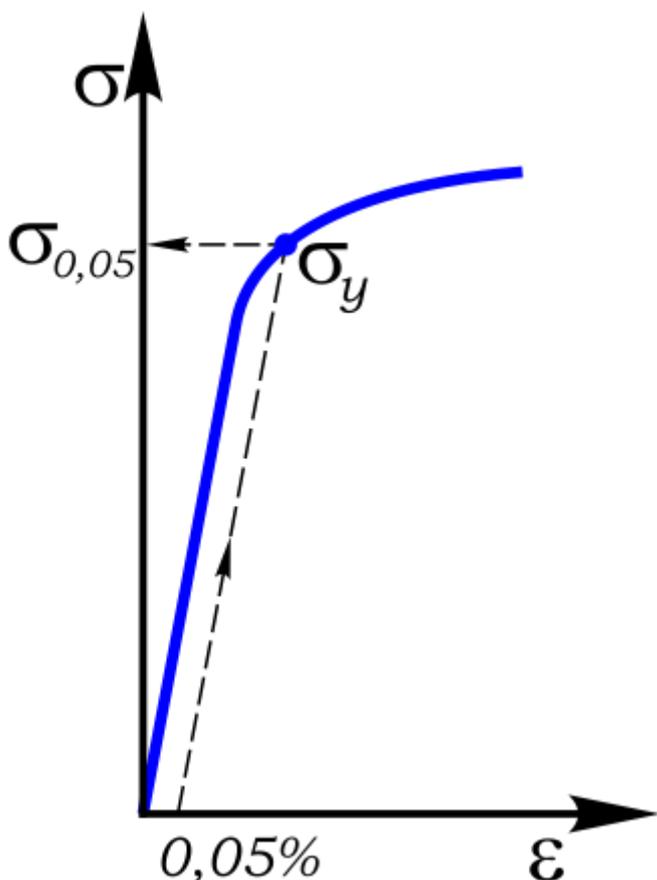


Рис. 1 Определение предела упругости

Для его определения (рис. 1) вдоль оси  $\varepsilon$  откладывается значение равное 0,05%, откуда проводится луч параллельный начальному участку диаграммы напряжений.

Точка его пересечения с линией диаграммы есть предел упругости для данного материала.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие нагрузки называются динамическими?
2. Приведите примеры динамического действия нагрузки.
3. Какое существует правило при расчете элементов конструкций, подверженных динамическим нагрузкам?
4. Как выражается динамическое напряжение через статическое?
5. Что называется динамическим коэффициентом?
6. Какое явление называется ударом и результатом чего оно является?
7. Какие допущения приняты при расчете элементов конструкций на ударную нагрузку?
8. Что называется повторно-переменной или циклической нагрузкой?
9. Приведите примеры элементов конструкций, испытывающих циклические нагрузки.
10. Что называется усталостью материала?
11. Что называется циклом напряжений?
12. Что такое симметричный, от нулевой и асимметричный циклы?  
Приведите примеры.
13. Что называется коэффициентом асимметрии цикла?
14. Что называется пределом выносливости? От каких факторов он зависит?

## Список используемой литературы

1. Олофинская В.П. Техническая механика. Курс лекций с вариантами практических и тестовых заданий.-М.: Инфра-М; Форум, 2011.
2. Вереина Л.И.,Краснов М.М. Техническая механика: Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. -М; Академия, 2015. 288 с.
3. Мархель И.И. Детали машин.-М.: Форум, 2015. 335 с.
4. Аркуша А.И. Техническая механика: Теоретическая механика и сопротивление материалов: Учебник для машиностроительных специализированных техникумов.- 2-е изд., доп.-М.: Высшая школа, 2006.- 352 с., ил.
5. Эрдеди А.А., Эрдеди Н.А. Детали машин- М.: Академия, 2013. 285 с.

### Дополнительные источники:

1. Мовнин М.С., Основы технической механики.-СПб; Политехника, 2011. 286 с.
2. Эрдеди А.А. Эрдеди Н.А. Теоретическая механика. Сопротивление материалов.- Р-н-Д; Феникс, 2010. 320 с.
3. Ивченко В.А. Техническая механика: Учебное пособие.-М.:ИНФРА-М.,2003.- 157 с.- (серия « Среднее профессиональное образование»).

### Интернет ресурсы

1. <http://www.teoretmeh.ru/>
2. <http://www.detalmach.ru/>
3. <http://mysopromat.ru/>
4. <http://www.soprotmat.ru/>
5. <http://www.toehelp.ru/theory/sopromat/>