

## Лекция 16 – Влияние времени нагружения и среды на механические свойства материалов

### Однократное статическое нагружение

Методы испытаний при однократном статическом нагружении были рассмотрены ранее.

При однократном статическом нагружении измеряют

- механические характеристики **прочности**:

Предел пропорциональности -  $\sigma_{п.ц.}$

Условный предел текучести -  $\sigma_{0,2}$

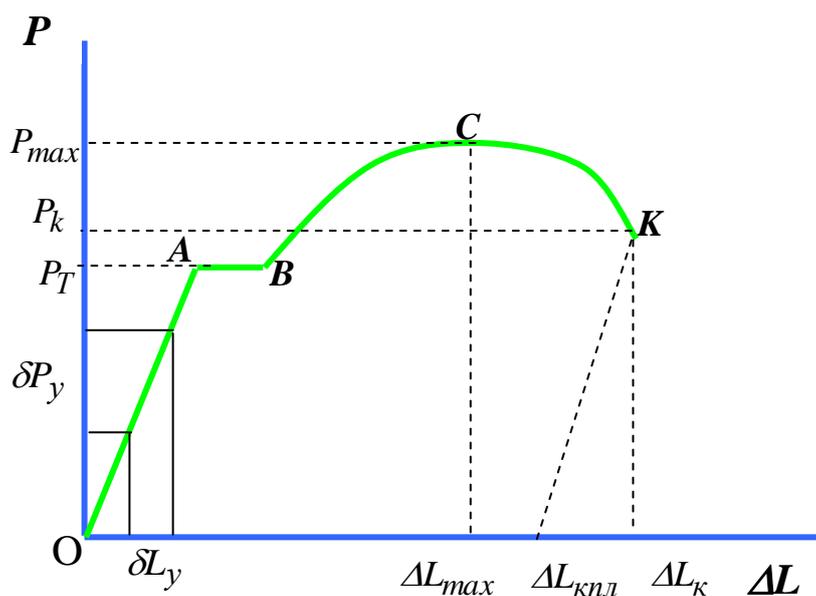
Предел прочности (временное сопротивление) -  $\sigma_b$

Истинное сопротивление разрыву -  $S_k$

- механические характеристики **пластичности**:

Относительное удлинение -  $\delta$

Относительное сужение -  $\psi$



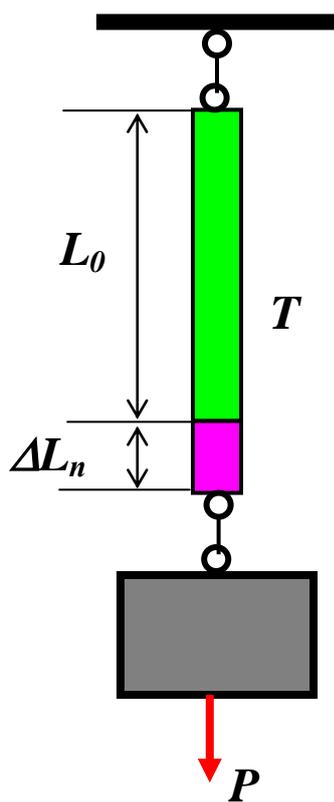
## Алгоритмы механических испытаний

№ П.П .	Наименование испытания	Геометрия образца	Вид деформации	Программа нагружения	Состояние среды	Программа измерений
1	На статическое растяжение	Гладкий цилиндрический	Растяжение	$\Delta = k.t$	$T = const$	$P = f(\Delta)$
2	На статическое кручение	Гладкий цилиндрический	Кручение	$\varphi = k.t$	$T = const$	$M = f(\varphi)$
3	На ползучесть	Гладкий цилиндрический	Растяжение	$P = const$	$T > T_{комн.}$ $T = const$	$\Delta = f(t)$
4	На релаксацию напряжений	Гладкий цилиндрический	Растяжение	$\Delta = const$	$T > T_{комн.}$ $T = const$	$P = f(t)$
5	На длительную прочность	Гладкий цилиндрический	Растяжение	$P = const$	$T > T_{комн.}$ $T = const$	$t_{разр.} = t_k - t_0$
6	На усталость (выносливость)	Гладкий цилиндрический	Растяжение, Изгиб	$P = P_0 \sin(\omega t)$	$T = const$	$N = (\omega / \pi)(t_k - t_0)$
7	На ударный изгиб	Призматический с надрезом	Изгиб	$mgh_0 = const$	$T_{xp} < T < T_{нл}$ $T = const$	$A_p = mg(h_0 - h_k)$

## Длительное статическое нагружение

### Испытания и расчеты на ползучесть

**Ползучестью** называют процесс медленного нарастания остаточных пластических деформаций под действием постоянной нагрузки



$$T \gg T_{\text{комн.}}$$

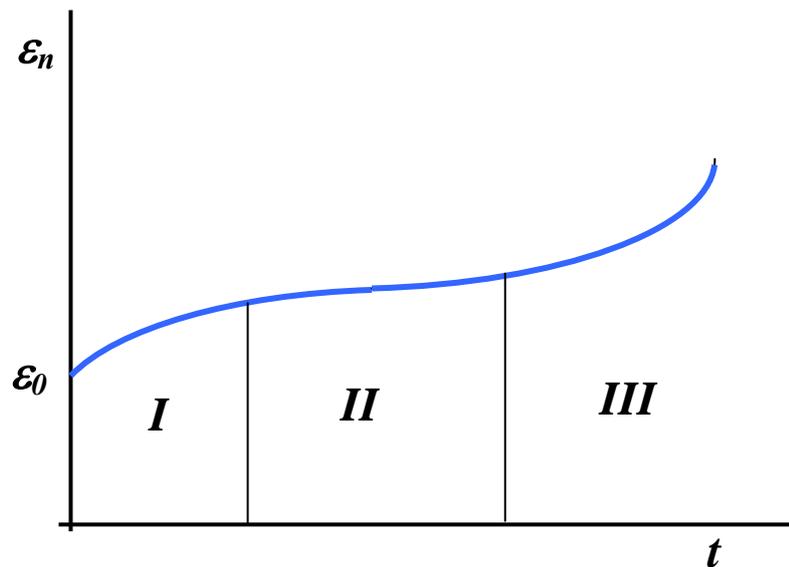
$$T = \text{const}$$

$$P = \text{const}$$

$$\Delta L_n = f(t)$$

$$\varepsilon_n = \Delta L_n / L_0$$

$$\varepsilon_n = F(t) \text{ — кривая ползучести}$$



I – стадия неустановившейся ползучести

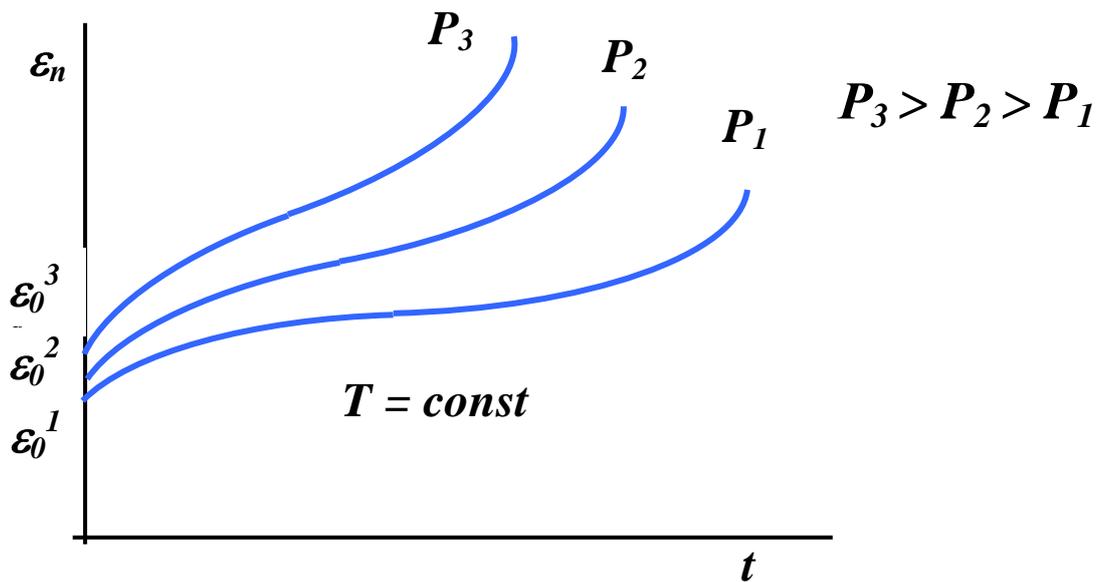
II – стадия установившейся ползучести

III – стадия ускоренной ползучести

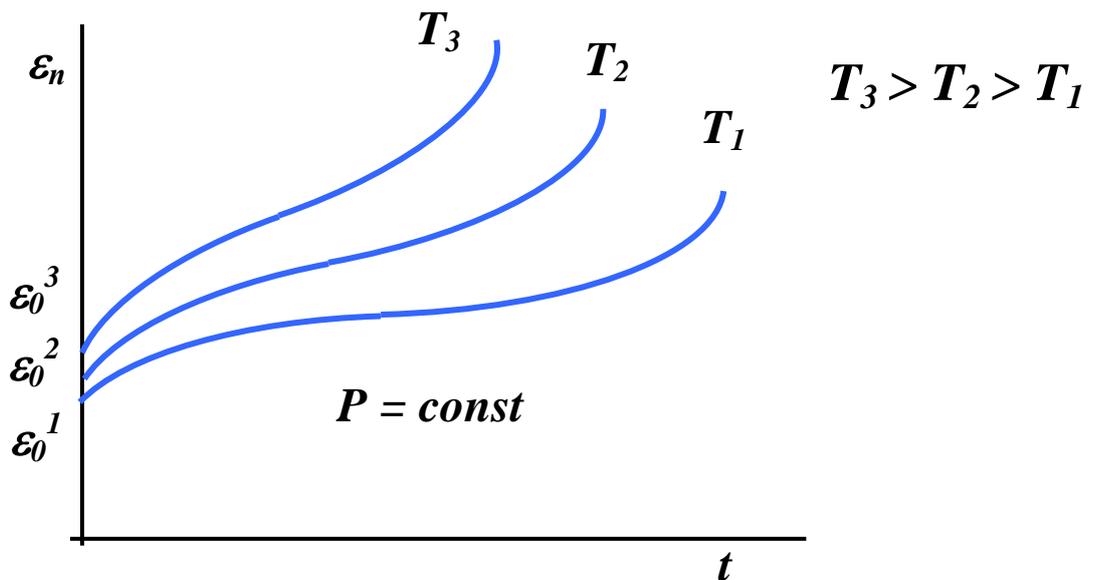
$\epsilon_0$  - мгновенная деформация, упругая или упругопластическая, возникающая при нагружении силой  $P$  при  $t = 0$ .

В упругом случае  $\epsilon_0 = P/EF$

Влияние нагрузки при постоянной температуре



Влияние температуры при постоянной нагрузке



Пределом ползучести  $\sigma_{\varepsilon_n}^{\tau}$  называют напряжение, при котором

за данное время  $\tau$  деформация ползучести достигает заданного значения  $\varepsilon_n^*$ .

Критериальные значения  $\tau$  и  $\varepsilon_n^*$  определяются техническими условиями на изделие. Например

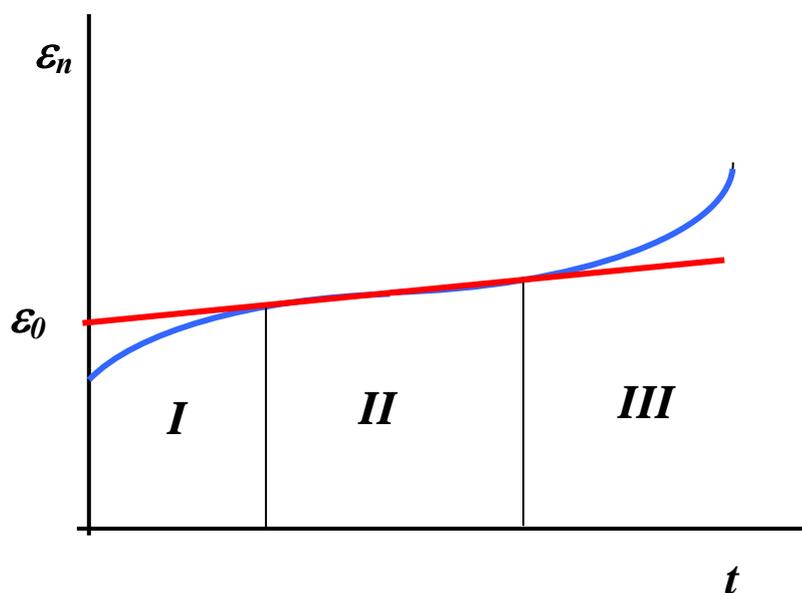
$$\sigma_{\varepsilon_n}^{\tau} = \sigma_{1\%}^{1000\text{час}}$$

В частности, значение  $\tau$  равно 300 часов для авиационных турбин и свыше 100000 часов для турбин ТЭС и АЭС.

Имеется и другое определение предела ползучести.

Пределом ползучести  $\sigma_{\varepsilon}^{\bullet}$  называют такое напряжение, при котором минимальная скорость ползучести равна значению  $\dot{\varepsilon}$ , устанавливаемому техническими условиями.

### Расчет на ползучесть



Кривую ползучести заменяют прямой, наклон которой совпадает с наклоном кривой ползучести на второй стадии. Считают, что

$$\dot{\varepsilon}_n = \text{const}$$

Тогда для любого момента времени можно дать оценку деформации

$$\text{ползучести } \varepsilon_n(t) = \dot{\varepsilon}_n t + \varepsilon_0$$

Экспериментально установлено, что  $\dot{\varepsilon}_n = A\sigma^m$ , где  $A$  и  $m$  - постоянные, определяемые для данного материала опытным путем.

1. Если предельно допустимая деформации ползучести  $[\varepsilon_n]$  известна, то критерий прочности

$$\varepsilon_n(t) \leq [\varepsilon_n] \quad \text{или} \quad A\sigma^m t + \varepsilon_0 \leq [\varepsilon_n]$$

откуда получаем допустимый временной ресурс работы изделия

$$t \leq ([\varepsilon_n] - \varepsilon_0) \frac{1}{A\sigma^m}.$$

2. Если известна предельно допустимая скорость ползучести  $[\dot{\varepsilon}_n]$ , то

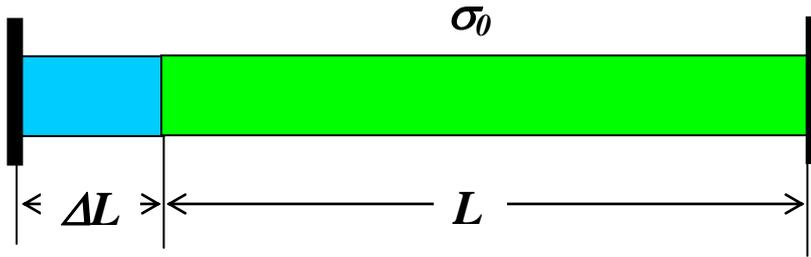
расчетное уравнение будет иметь вид  $\dot{\varepsilon}_n = A\sigma^m \leq [\dot{\varepsilon}_n]$

и получаем допустимое рабочее напряжение  $\sigma \leq \left( \frac{[\dot{\varepsilon}_n]}{A} \right)^{1/m}$ .

## Релаксация напряжений

**Релаксация напряжений** – это явление снижения напряжений в нагруженной детали, полная деформация которой остается постоянной.

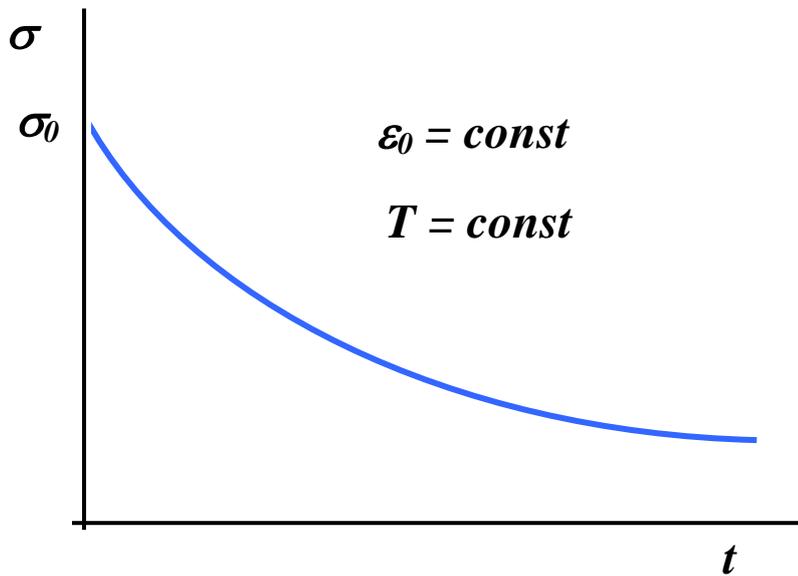
Допустим, что стержень, имеющий длину  $L$ , растянут на  $\Delta L$  и жестко закреплен в этом состоянии.



$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon_y + \varepsilon_n = \text{const}$$

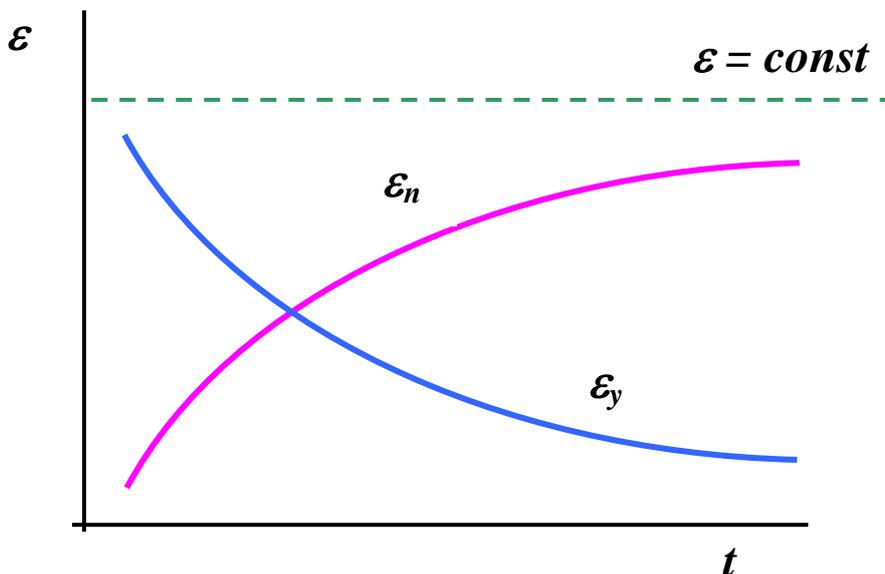
ИЛИ

$$\frac{d\varepsilon_y}{dt} + \frac{d\varepsilon_n}{dt} = 0; \quad \dot{\varepsilon}_y = -\dot{\varepsilon}_n$$



Кривая релаксации напряжений

**Релаксация напряжений** – это одно из проявлений явления ползучести в условиях *медленно изменяющихся* напряжений.

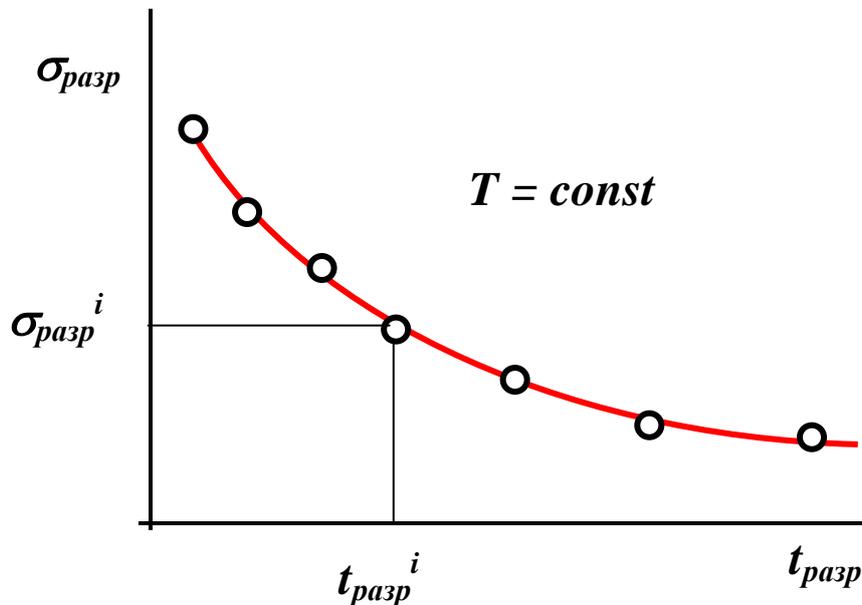


Падение напряжений связано с переходом упругой деформации в пластическую деформацию. Рост пластической деформации  $\varepsilon_n$  сопровождается уменьшением  $\sigma_y$  :

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad ; \quad \frac{\sigma_y}{E} + \varepsilon_n = const .$$

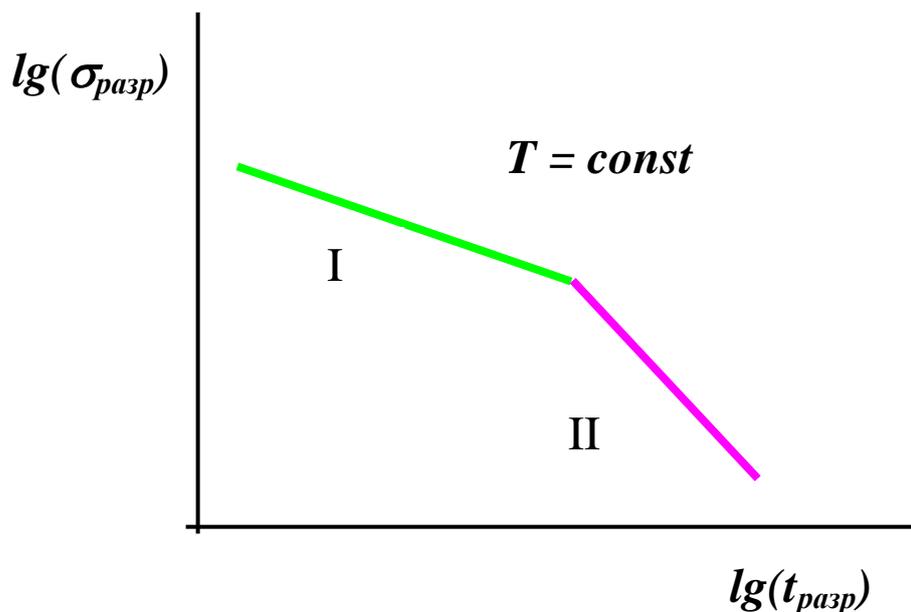
### *Длительная прочность*

Проведем ряд испытаний на ползучесть до полного разрушения образцов при различных напряжениях  $\sigma_{разр}^i$ . Для каждого напряжения  $\sigma_{разр}^i$  измерим время  $t_{разр}^i$ , которое выдержал образец при этом напряжении. Построим кривую зависимости времени разрушения от напряжения. Это будет *кривая длительной прочности*.



*Длительная прочность* – сопротивление материала разрушению при длительном статическом нагружении при повышенных температурах.

В двойных логарифмических координатах кривая длительной прочности приобретает вид сломанной прямой.



Излом на графике указывает на изменение механизма разрушения.  
 Область I - вязкое разрушение по телу зерна  
 (транскристаллитное разрушение);  
 Область II - хрупкое разрушение по границам зерен  
 (интеркристаллитное разрушение).

Предел длительной прочности – это напряжение  $\sigma_{\tau}$ , при котором разрушение происходит по истечении определенного промежутка времени  $\tau$  при заданной температуре испытаний  $T$ .

Критерий длительной прочности имеет вид

$$\sigma \leq [\sigma_{д.п}],$$

где

$$[\sigma_{д.п}] = \frac{\sigma_{\tau}}{n}, \quad n - \text{коэффициент запаса.}$$

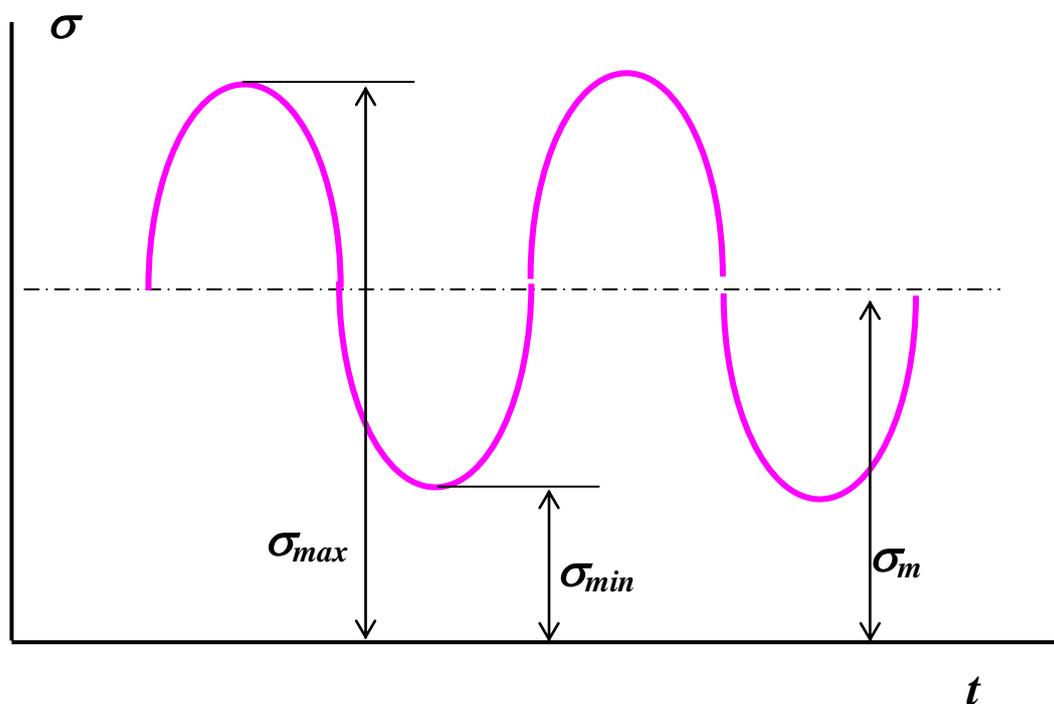
## Длительное циклическое нагружение

Во многих случаях детали машин и элементы конструкций подвергаются длительному циклическому нагружению.

**Усталость** – процесс разрушения материала при циклическом нагружении.

**Выносливость** – сопротивление материала усталостному разрушению.

Рассмотрим характеристики цикла нагружения.



Размах напряжений цикла :

$$\sigma_p = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Амплитуда цикла:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_p}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

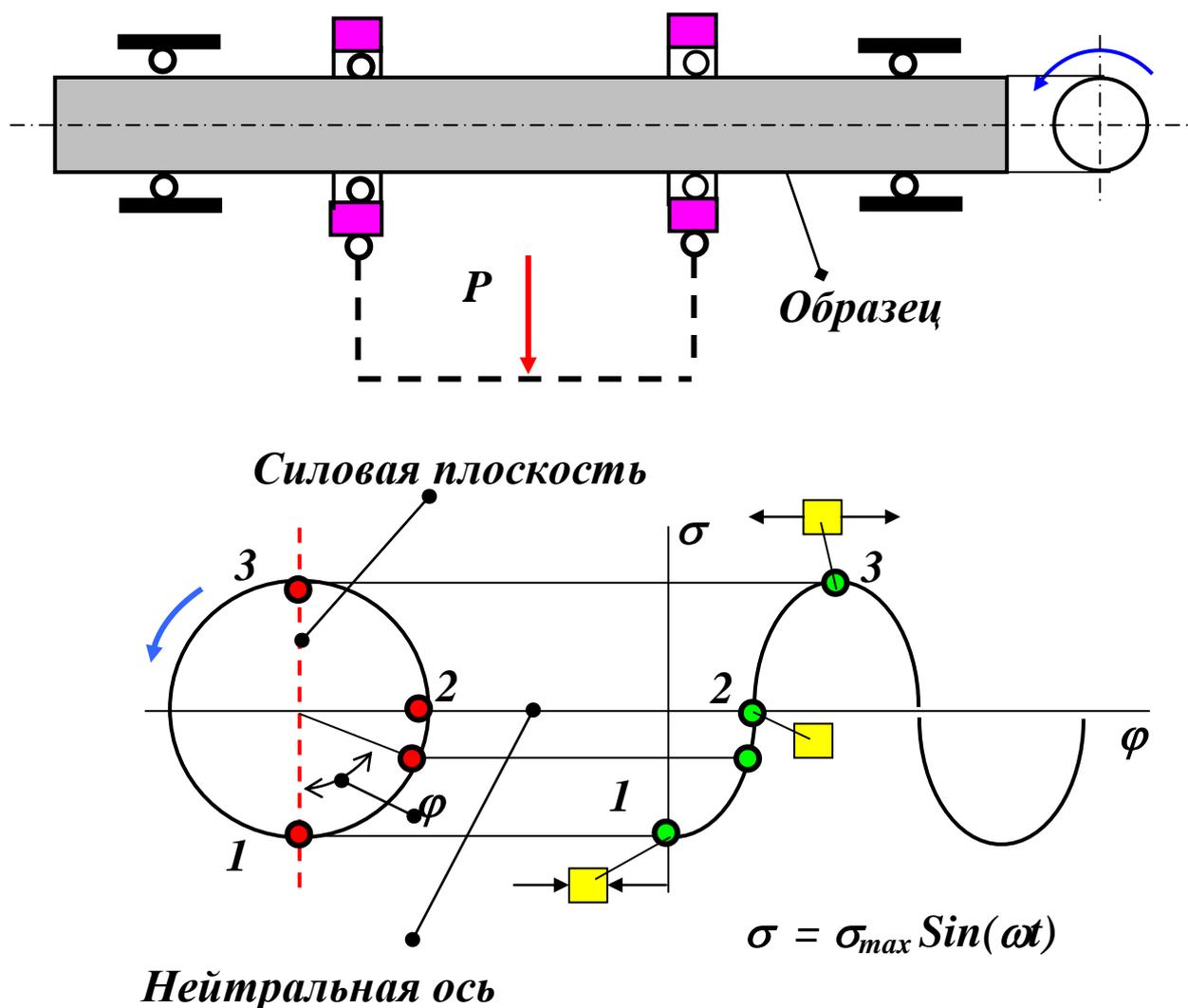
Среднее напряжение цикла:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

Коэффициент асимметрии цикла:

$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

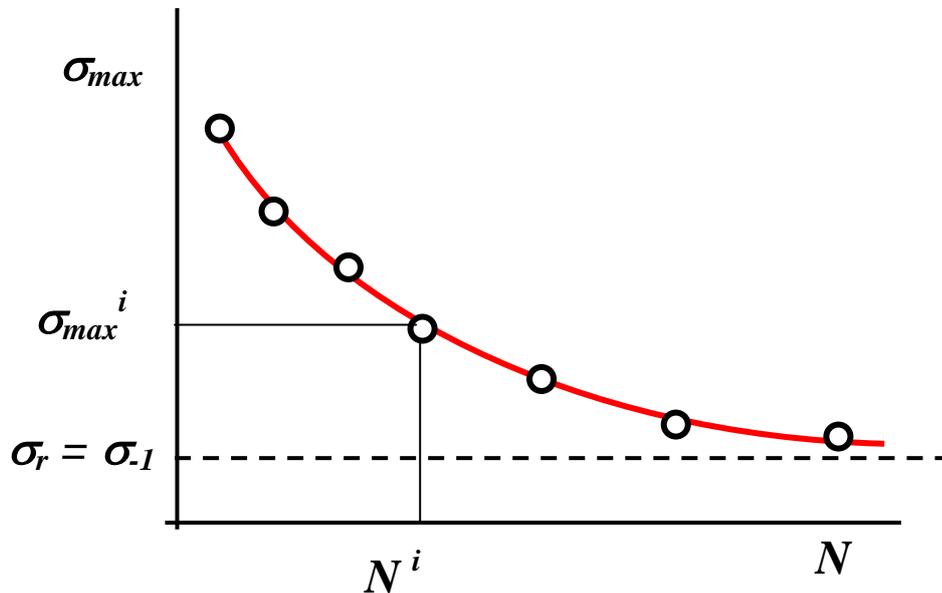
Испытания чаще всего проводят при изгибе вращающегося цилиндрического образца. Изгиб может быть поперечным или чистым. Рассмотрим нагружение при чистом изгибе.



В результате испытаний каждого образца, испытанного при некоторой амплитуде напряжений  $\sigma_{max}$ , измеряют число циклов  $N$ , которое выдержал данный образец при данной амплитуде напряжений.

Повторяя испытания для разных  $\sigma_{max}$ , получают кривую усталости – зависимость числа циклов до разрушения образца от амплитуды циклических напряжений.

## Кривая усталости



Для черных металлов существует физический предел усталости.

**Предел усталости (предел выносливости)** – это максимальное напряжение  $\sigma_r$ , при котором образец не разрушится при любом числе циклов нагружения  $N$ . При этом кривая усталости имеет асимптоту.

Для цветных металлов кривая усталости не выходит на асимптоту. Для них определяют **условный предел усталости** – напряжение  $\sigma_r$ , при котором образец выдерживает заданное число циклов нагружения, например,  $N=10^8$ .

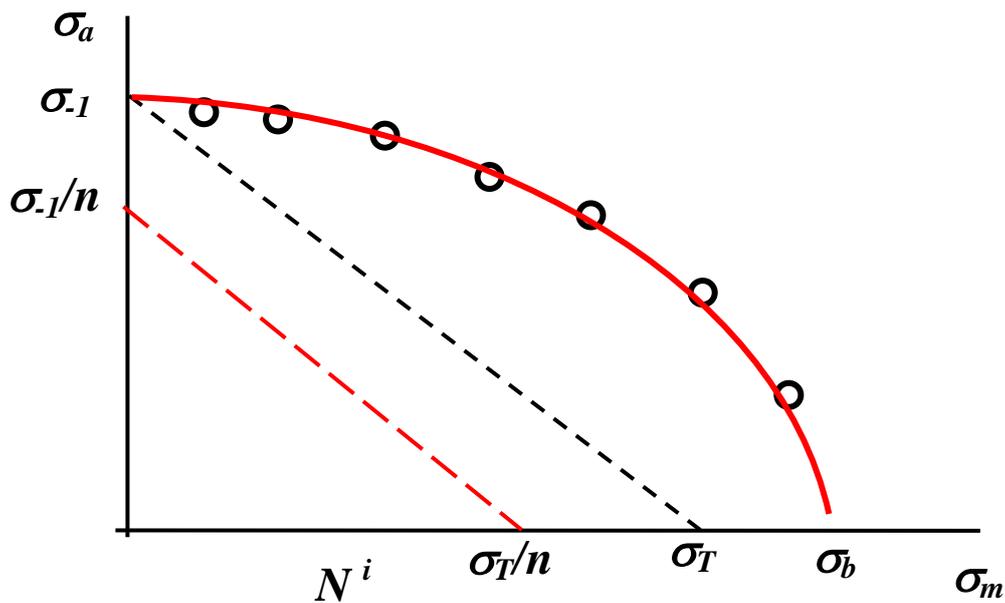
Существует корреляция между пределом прочности  $\sigma_b$  и пределом усталости  $\sigma_r$ :

Для сталей:  $\sigma_r = (0,4 - 0,5)\sigma_b$ ;

Для цветных металлов:  $\sigma_r = (0,25 - 0,5)\sigma_b$ ;

## Диаграмма предельных циклов

Спланируем такие исследования. При различных значениях среднего напряжения цикла  $\sigma_m$  будем проводить испытания с различными амплитудами цикла нагружения  $\sigma_a$  и определять предел усталости для всех значений  $\sigma_{max}$ . По результатам этих трудоемких испытаний построим зависимость  $\sigma_{max}$  от  $\sigma_m$  - *диаграмму предельных циклов*:



Максимальное напряжение цикла равно  $\sigma_{max} = \sigma_a + \sigma_m$ .

При симметричном цикле нагружения предельное значение среднего напряжения  $\sigma_m = \sigma_b$  и амплитуда цикла  $\sigma_a = 0$ .

Для расчетов действительную *диаграмму* предельных циклов заменяют на *прямую* предельных циклов, которую проводят через точки  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_T$  на координатных осях. Уравнение этой *прямой предельных циклов* имеет вид:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_T} = 1 \quad \text{или} \quad \sigma_a = \sigma_{-1} - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T} \sigma_m.$$

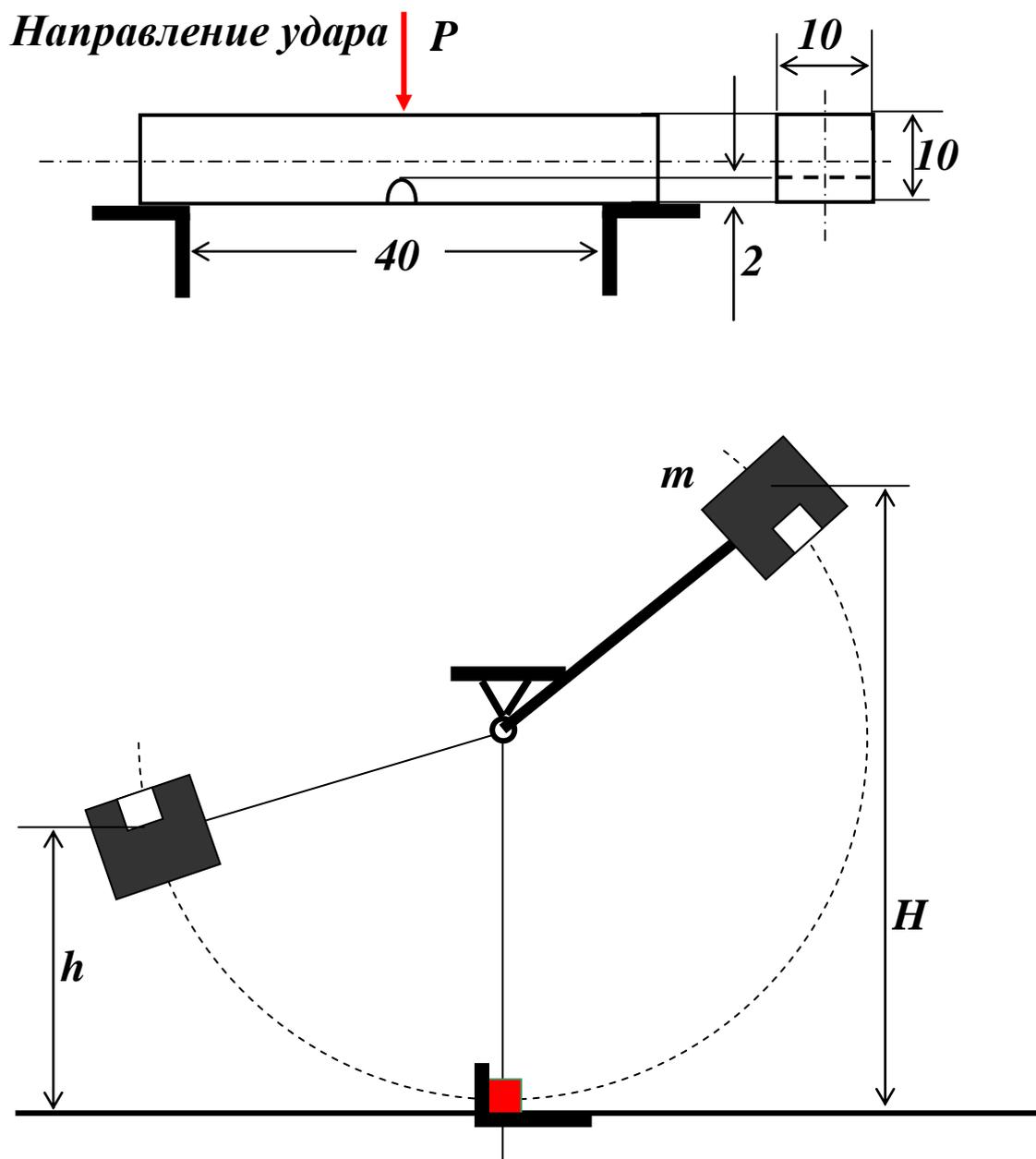
Если ввести коэффициент запаса  $n$  по статической прочности, то получаем предельную прямую предельных циклов:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_T} = \frac{1}{n}.$$

Конструкция будет прочной, если напряжения таковы, что соответствующая точка лежит под предельной прямой предельных циклов.

Ударные испытания.

Цель ударных испытаний – оценка склонности конструкционных материалов к хрупкому разрушению. Испытания проводят на стандартных (для всего цивилизованного мира) нарезанных призматических образцах, размеры которых стандартизированы.



Маятник поднимают на высоту  $H$  и он запасает энергию

$$A_H = mgH.$$

Затем маятник падает, разрушает образец и поднимается на высоту  $h$ .

Потенциальная энергия маятника после удара равна

$$A_K = mgh.$$

Работа  $A$ , которую затрачивает маятник на пластическую деформацию и разрушение образца, равна

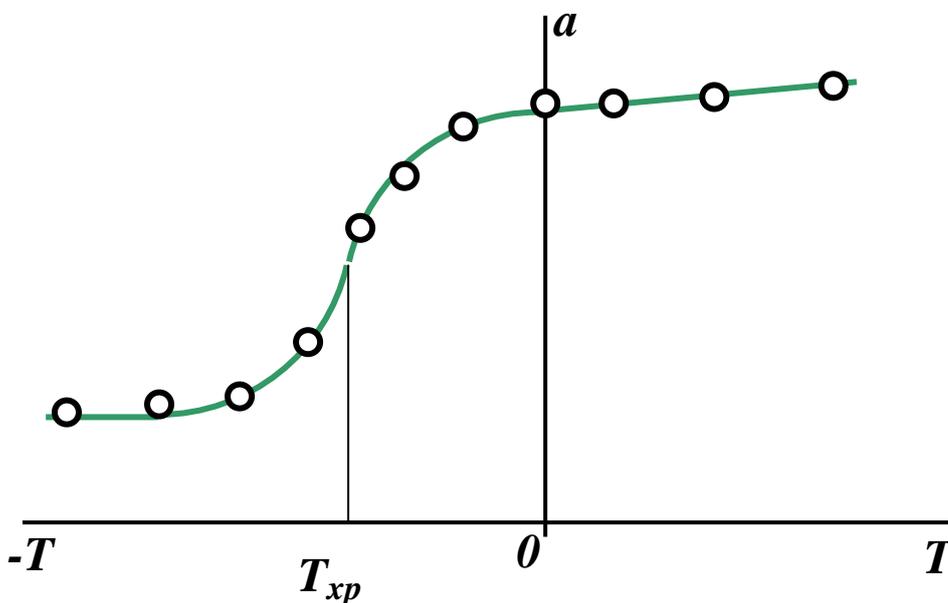
$$A = A_H - A_K = mg(H-h).$$

Удельную работу ударного разрушения образца (ударную вязкость) определяют как

$$a = \frac{A}{F},$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения образца в месте надреза.

Испытания проводят при различных температурах  $T$ , что позволяет построить кривую зависимости ударной вязкости материала  $a$  от температуры испытаний  $T$  измерить критическую температуру хрупкости  $T_{xp}$ :



При температурах, которые меньше критической температуры хрупкости,  $T < T_{xp}$ , материал становится хрупким.

Его можно применять в диапазоне температур

$$T_{xp} < T < T_{ползучести} ,$$

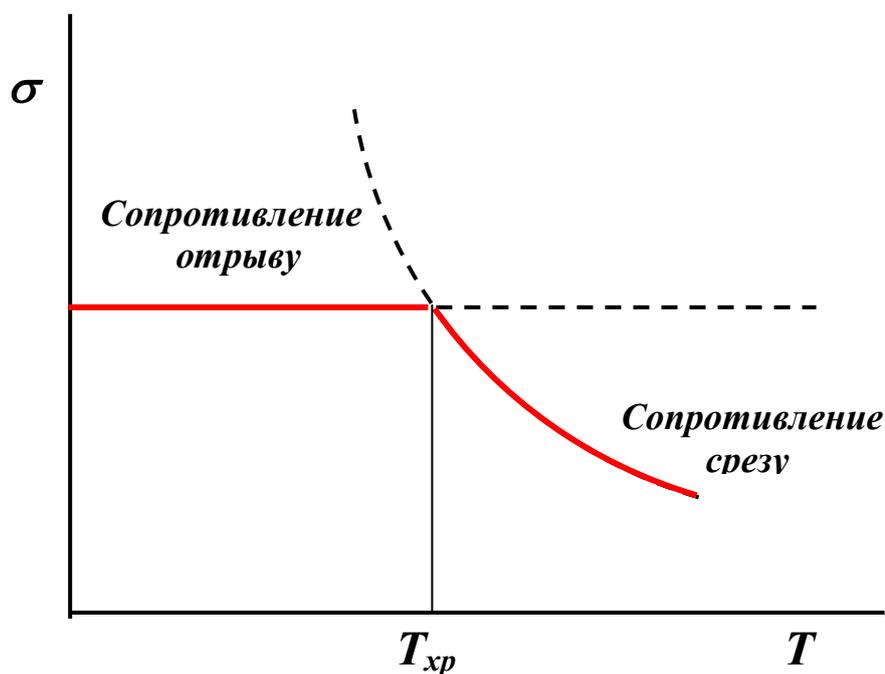
где  $T_{ползучести}$  – температура, выше которой имеет место заметное проявление ползучести конструкционного материала.

### *Схема А.Ф. Иоффе*

Иоффе А.Ф., на основании своих опытов с образцами каменной соли, предположил, что сопротивление материала хрупкому разрушению (отрыв) не зависит от температуры материала.

В тоже время, сопротивление материала вязкому разрушению (срез) повышается с понижением температуры.

Точка пересечения кривых зависимости сопротивления хрупкому и вязкому разрушению от температуры соответствует критической температуры хрупкости.



## Влияние среды на механические свойства конструкционных материалов

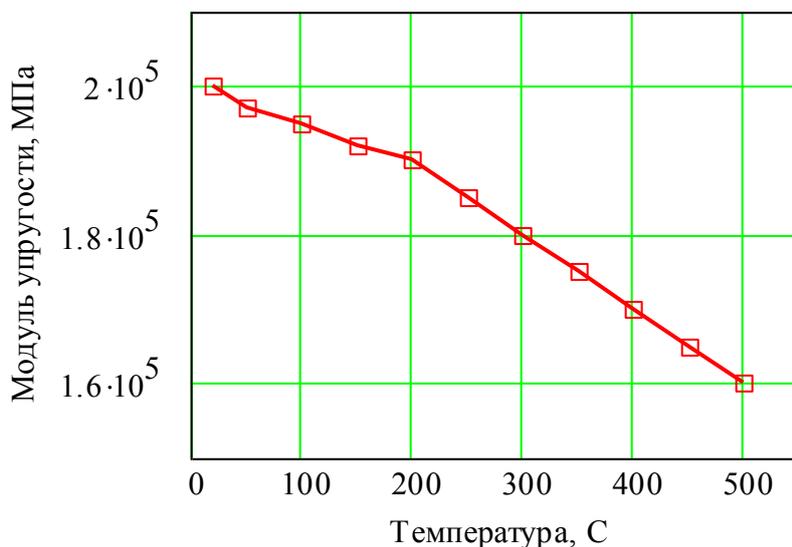
Окружающая среда оказывает существенное влияние на процессы пластической деформации и разрушения (рост трещин) в конструкционных материалах. Это воздействие среды связано с такими свойствами среды, как

- Температура среды
- Химическое (коррозионное) состояние среды
- Водородное охрупчивание
- Наличие в среде поверхностно активных веществ
- Присутствие светового и радиационного облучения

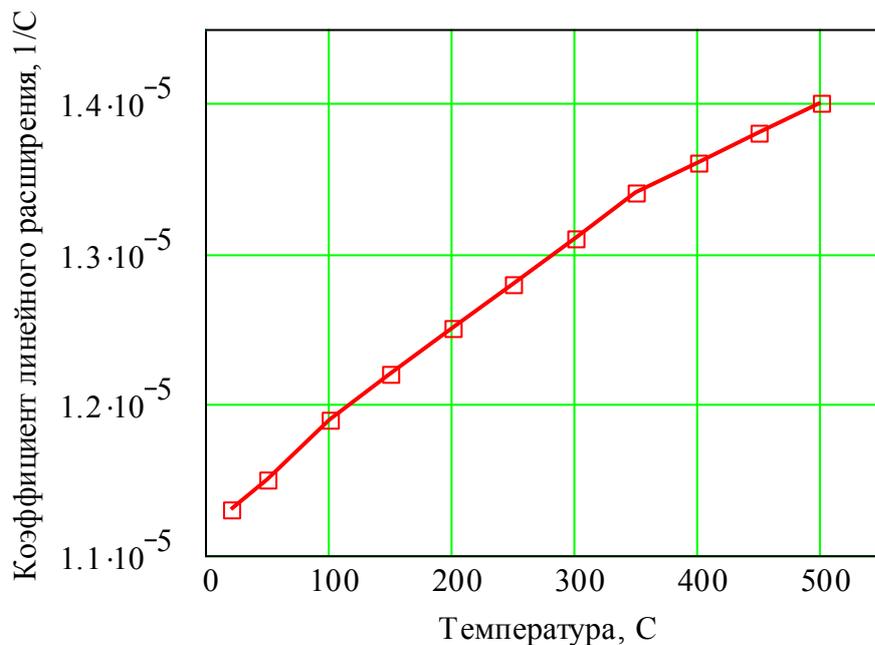
### *Влияние температуры среды*

Влияние температуры на длительную прочность (на процессы ползучести и релаксации напряжений) рассмотрено в отдельной лекции.

Рассмотрим влияние температуры на физико-механические свойства при однократном статическом нагружении. Например, для стали 20 в соответствии с Нормами прочности АЭС имеем следующие зависимости.

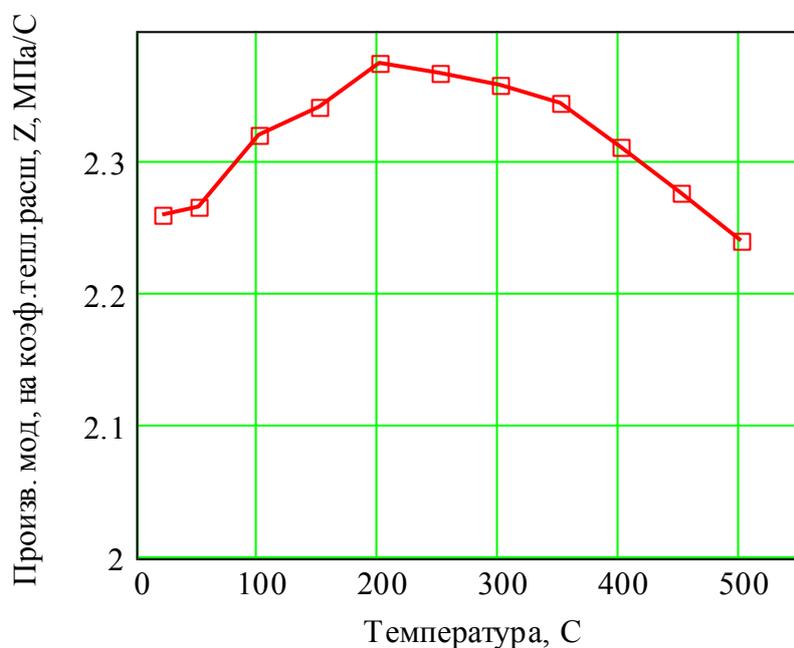


***Сталь 20. Зависимость модуля упругости от температуры***



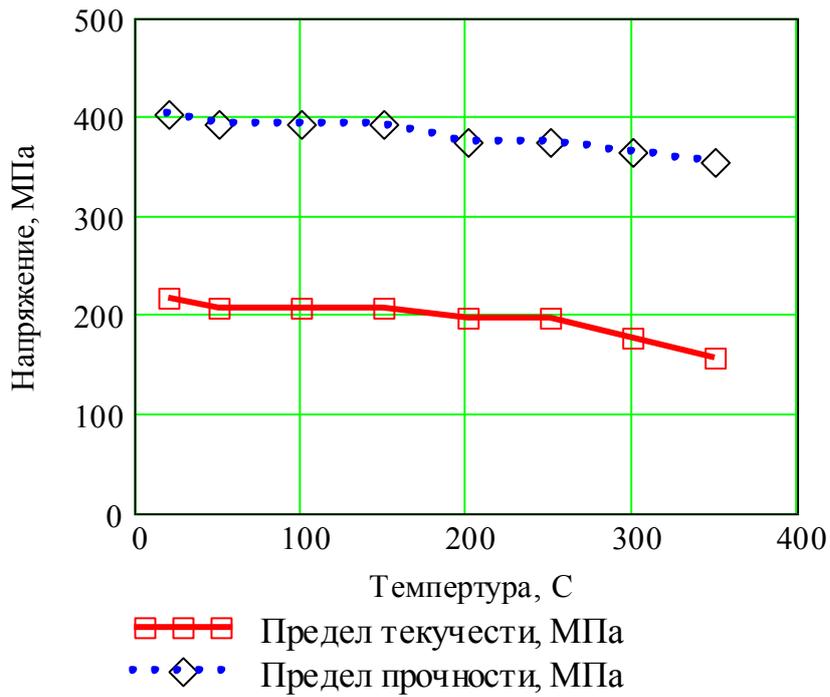
**Сталь 20. Зависимость коэффицента линейного теплового расширения от температуры**

$$Z_i = E_i \cdot \alpha_i$$

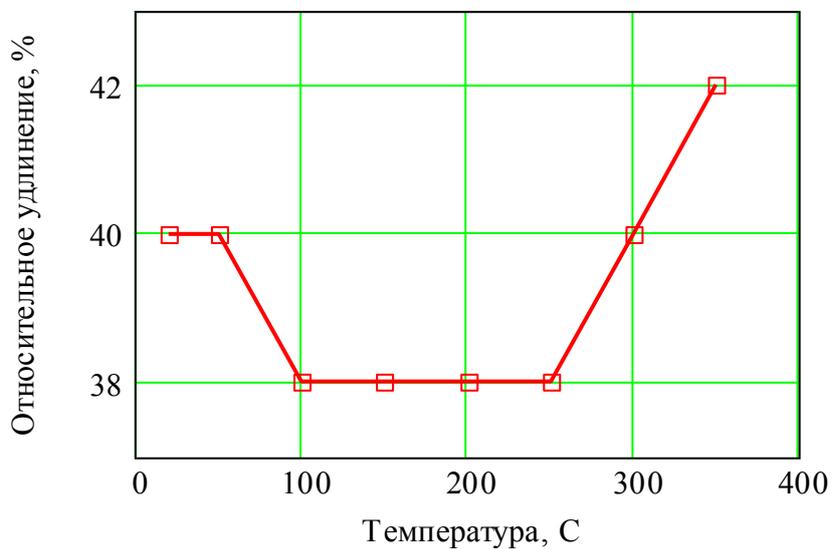


10
11

**Сталь 20. Зависимость произведения модуля упругости на коэффицента линейного теплового расширения от температуры**



**Сталь 20. Влияние температуры на предел текучести и предел прочности**



**Сталь 20. Влияние температуры на относительно удлинение**

## ***Коррозионное воздействие среды***

Коррозионное воздействие среды проявляется в течение длительного времени эксплуатации. Оно приводит к необратимому повреждению структуры материала.

***Коррозия*** – это разрушение материала, обусловленное химическим взаимодействием металла с коррозионной средой.

Различают следующие виды коррозии.

- ***Непосредственное химическое воздействие среды.*** При этом поверхность изделия корродирует более или менее равномерно. Происходит постепенное разрушение материала по поверхности и, соответственно, уменьшение размеров поперечного сечения. Скорость утонения при таком виде коррозии оценивают по результатам лабораторных испытаний образцов в соответствующей среде. Скорость коррозии измеряют в единицах мм/год. Скорость коррозии замедляют подбором химсостава материала, нанесением на поверхность разнообразных покрытий или изменением состава окружающей среды.
- ***Электрохимическая коррозия.*** Возникает, когда два соседних разнородных участка металла замыкаются электролитической средой. Разнородность участков металла обуславливает возникновение разности потенциалов. Электрическая цепь замыкается через среду. Возникает электрический ток, сопровождающийся переносом ионов и разрушением поверхности изделия.
- ***Щелевая коррозия.*** Это ускоренная коррозия в надрезах, трещинах и прочих дефектах, где движение коррозионной среды затруднено.
- ***Эрозионно-коррозионный износ.*** Это процесс локальной коррозии, ускоренный быстрым движением среды, например в трубопроводах АЭС. Возникают локальные утонения труб в области турбулизаторов течения среды – колен, диафрагм, тройников.
- ***Межкристаллитная коррозия.*** Это коррозия уязвимых мест у границ зерен металла. Она сопровождается резким изменением прочности границ между зернами. Эти изменения необратимы. В результате происходит снижение пластичности материала и хрупкое разрушение.
- ***Коррозионное растрескивание под напряжением.*** Растягивающие напряжения в материале приводят к существенному увеличению влияния на конструкционную прочность материалов. При

этом уровень напряжений может быть значительно ниже предела текучести и практически равен эксплуатационному уровню.

Механические напряжения оказывают синергетическое воздействие на процессы коррозии, поскольку с ними связан запас потенциальной энергии, необходимой для интенсификации процессов коррозии.

Коррозионные явления оказывают максимальное влияние на длительную статическую или циклическую прочность, когда фактор времени становится преобладающим..

Рассмотри примеры влияния коррозионной среды.

1. Чистое железо в 50% аммонии (азотнокислый аммоний) имеет длительную прочность в три раза меньше, чем на воздухе.
2. Предел усталости стали ШХ-15 в кипящей воде в пять раз ниже, чем на воздухе. Он падает с 850 МПа до 150 МПа.
3. Коррозионный износ и последующий разрыв 500-мм трубопровода второго контура АЭС Михама (Япония) создал аварийную ситуацию, в результате которой на полгода были остановлены 15 аналогичных блоков АЭС.

**Водородное охрупчивание.** Это проникновение водорода в металл, в результате которого образуются хрупкие гидриды. Пластичность наводороженного металла тем меньше, чем больше содержание водорода.

Существенную опасность водородное охрупчивание представляет для сплавов циркония, которые являются основными конструкционными материалами для активных зон энергетических реакторов АЭС и надводного и подводного флота.

### **Влияние поверхностно-активных веществ (Эффект Ребиндера).**

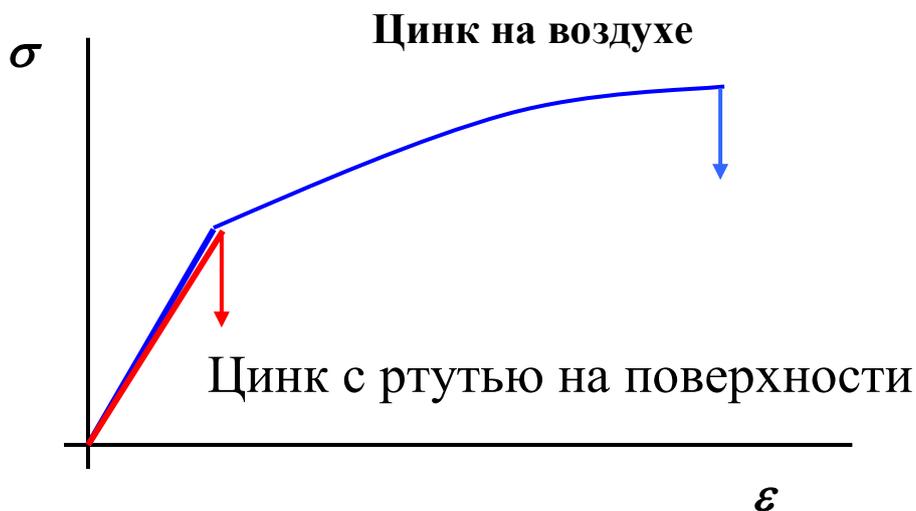
Академик АН СССР Ребиндер П.А. обнаружил, что существуют ряд веществ, которые оказывают специфическое избирательное влияние на механическое поведение материалов – они могут изменять уровень поверхностной энергии твердых тел.

В соответствии с теорией хрупкого разрушения Гриффитса, именно поверхностная энергия образования новых поверхностей является тем фактором, который определяет степень хрупкости материала.

Эффект Ребиндера проявляется в двух формах – охрупчивание и пластифицирование.

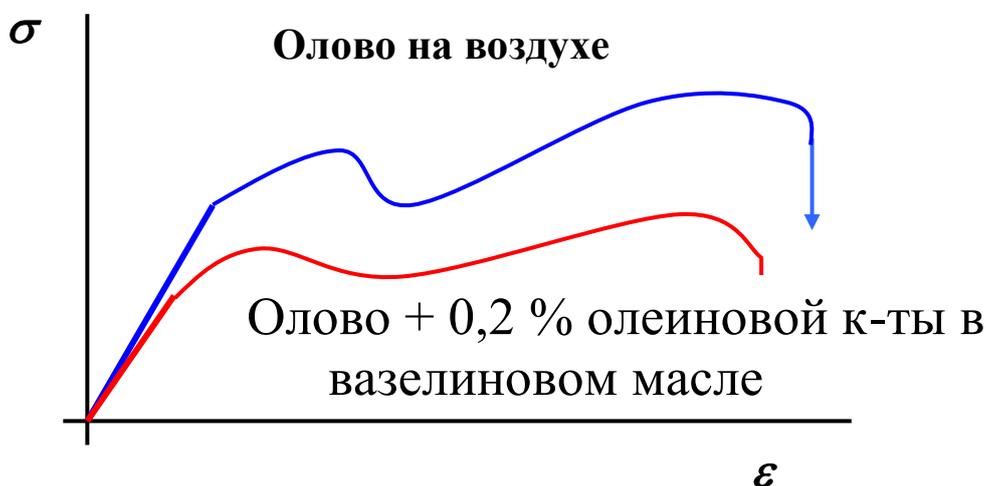
**Охрупчивание.** Это резкое снижение пластичности и прочности под действием жидкой среды, сходной с твердым телом по своей молекулярной природе. Для металлов такими средами являются жидкие металлы иной группы.

Например, латунь и цинк становятся хрупкими в присутствии ртути.



**Пластифицирование.** Это снижение сопротивления пластической деформации твердого тела в присутствии поверхностно-активного вещества.

Например, монокристалл олова в присутствии олеиновой кислоты в вазелиновом масле существенно теряет сопротивление пластической деформации. Предел текучести падает почти в три раза.

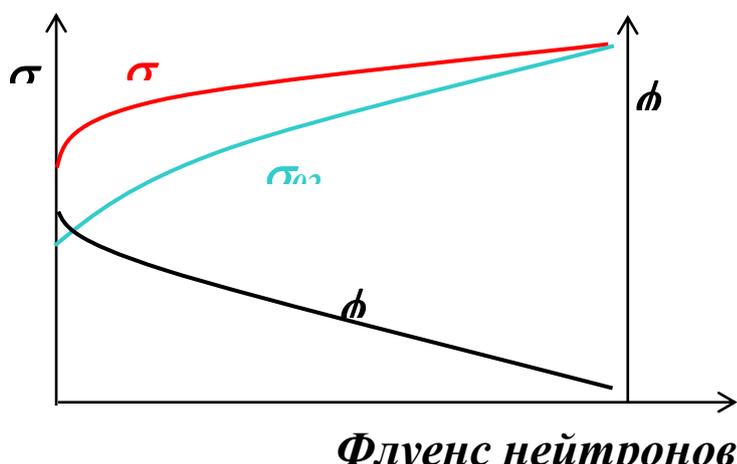


**Влияние облучения.** На механические свойства влияет как радиационное, так и световое облучение. При этом влияние светового облучения существенно в основном для неметаллических твердых тел.

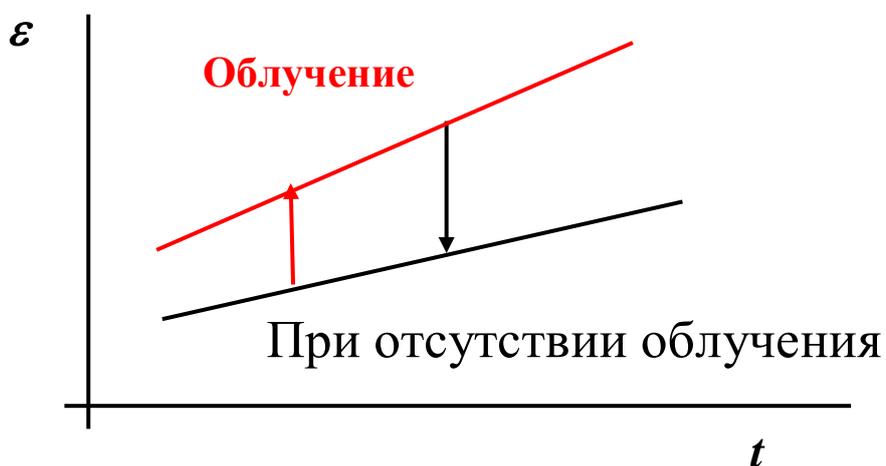
**Нейтронное облучение.** Влияние нейтронного реакторного облучения на механические свойства конструкционных материалов зависит от температуры облучаемого тела. С повышением температуры влияние эффекта отжига радиационных дефектов становится сравнимым с эффектом радиационного охрупчивания.

При прочих равных условиях с ростом интегрального потока (дозы) облучения (флуенса нейтронов) наблюдается

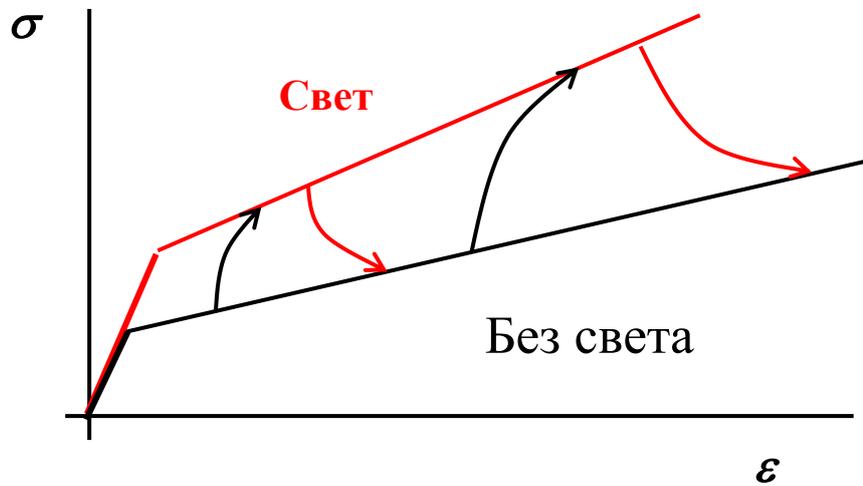
- Рост предел текучести  $\sigma_{02}$
- Рост предела прочности (временного сопротивления)  $\sigma_b$
- Падение до нуля пластичности (относительного удлинения)  $\phi$



Присутствие нейтронного облучения приводит к увеличению скорости ползучести в несколько раз. Например, на второй стадии ползучести наблюдается следующее явление:



**Фотопластический эффект.** Освещение обычным светом некоторых твердых тел, например сернистого кадмия (CdS) приводит к изменению диаграммы статического деформирования.



Освещение приводит к усиленному перемещению электронов и, поэтому, к торможению движения дислокаций и повышению сопротивления пластическим деформациям.