

# Механические свойства твердых тел и методы их определения

Некоторые механические свойства являются особенно важными, образуя совокупность так называемых **конструктивных критериев: прочности, надежности и долговечности.**

**Критерии прочности:** модули упругости (при работе на растяжение-сжатие -это модуль Юнга), предел текучести, предел прочности.

**Надежность – свойство материала противостоять хрупкому разрушению.**

**Критерии надежности – ударная вязкость, температурный порог хладноломкости.**

**Долговечность – свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения, причинами которого могут являться усталость, ползучесть, коррозия, изнашивание и т.д.**

**Критерии долговечности:** циклическая долговечность (она характеризует сопротивление материала усталостным разрушениям), износостойкость (сопротивление изнашиванию).

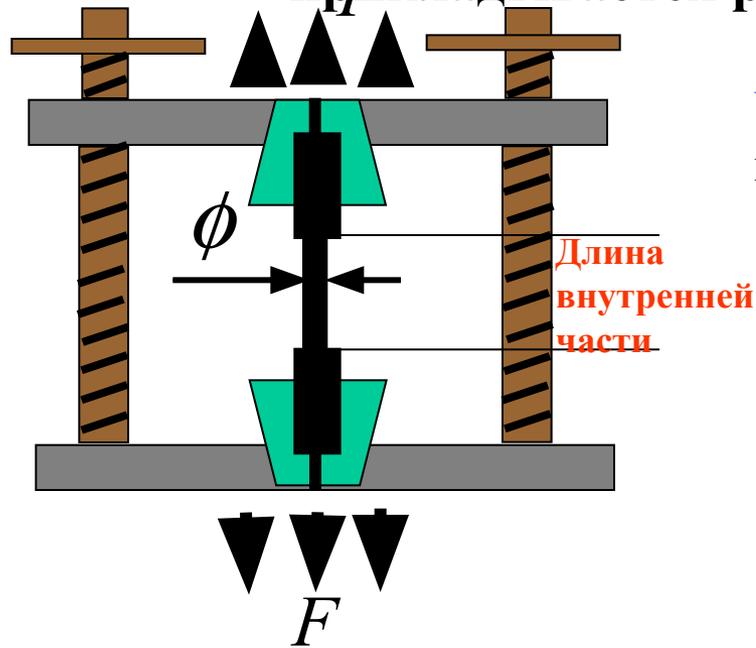
**Механические испытания (тесты) в зависимости от скорости приложения нагрузки принято подразделять на статические и динамические, в т.ч. знакопеременные, или циклические.**

**Статические: тесты на растяжение, сжатие, изгиб, твердость, ползучесть;**

**Динамические: – тесты на ударную вязкость и усталость.**

# СТАТИЧЕСКИЕ ТЕСТЫ (ИСПЫТАНИЯ)

**Тест на растяжение** измеряет сопротивление материала статической или медленно возрастающей силе. Тестируемый образец обычно имеет форму цилиндрической катушки со стандартными параметрами, например, **диаметром внутренней части 12.5 мм и длиной 50 мм**. Он закрепляется в растягивающем устройстве с помощью 2 зажимов. Затем **прикладывается растягивающая сила (нагрузка)  $F$** .



**Условное напряжение:** отношение силы  $F_k$  исходной площади поперечного сечения образца  $A_0$

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

**Условная деформация:**

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

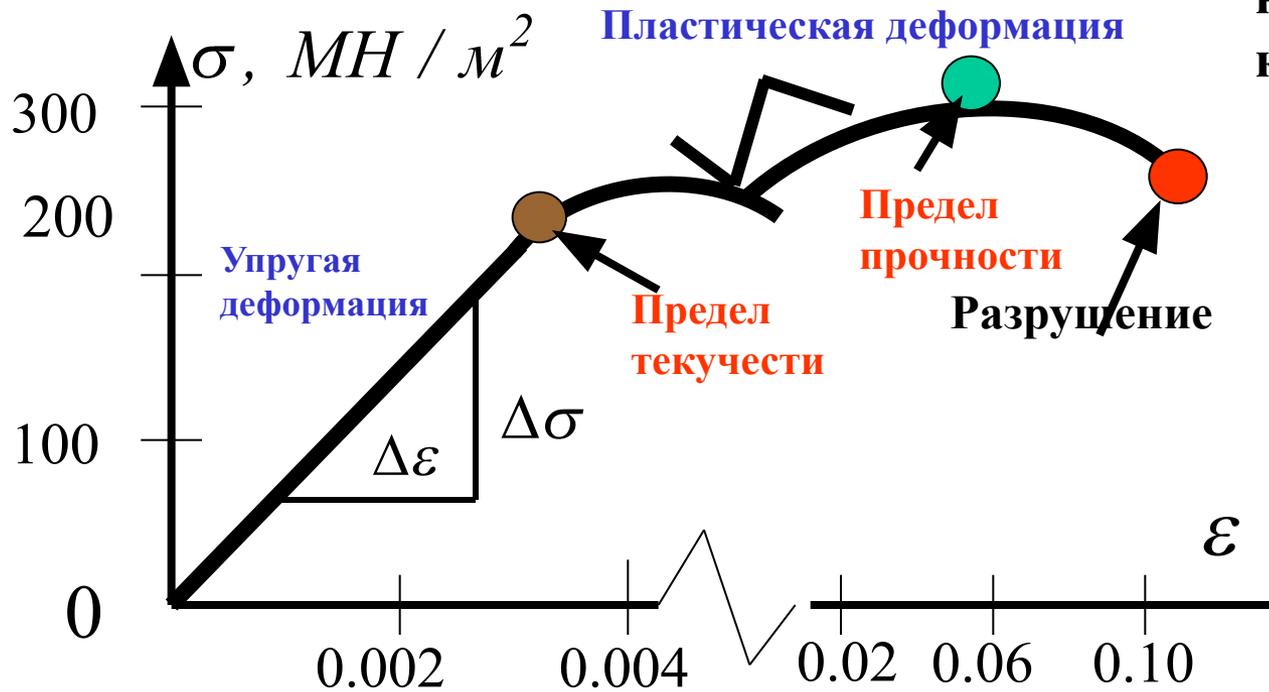
$l_0$  -исходная длина внутренней части  
 $l$  -длина внутренней части после приложения силы  $F$

$$[\sigma] = \text{H} / \text{м}^2 = \text{Па}$$

Деформация является безразмерной.

**При испытаниях на растяжение определяются модуль Юнга, пределы текучести (несколько видов) и прочности.**

# Типичная кривая нагрузочных испытаний



В упругой области наклон нагрузочной кривой постоянен.

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = const$$

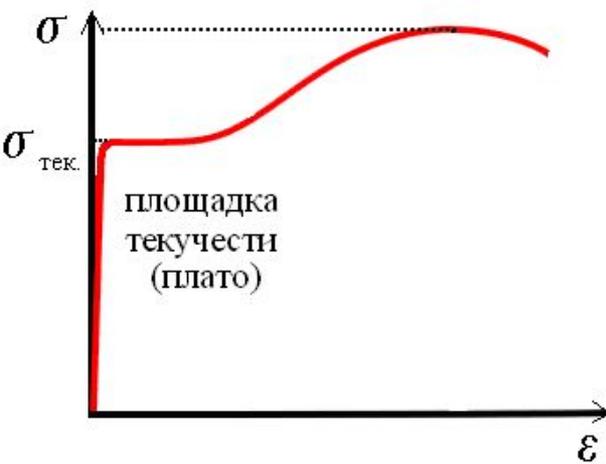
$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon} = E$$

$E$  - модуль Юнга

**Закон Гука**

$$\sigma = \epsilon E$$

**Предел прочности**  $\sigma_{пр.}$  – это максимальное напряжение на нагрузочной кривой, или напряжение при максимальной приложенной силе.

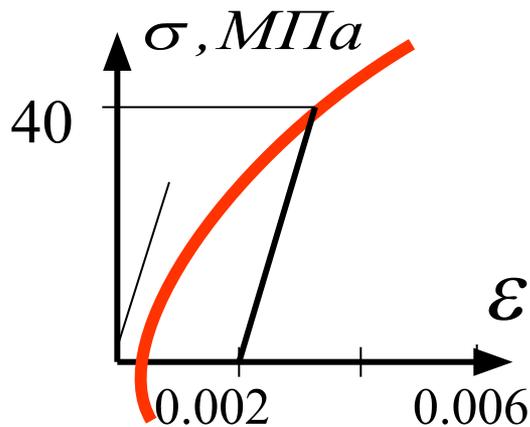


Для материалов, имеющих ярко выраженную площадку текучести (т.е. плато на нагрузочной кривой), определяется **предел текучести**, как **напряжение**, соответствующее началу течения.

Для большинства материалов площадка текучести отсутствует, поэтому граница между упругой и пластической деформацией не может быть точно определена.

Для них предел текучести определяется по определенному уровню деформации, обычно 0,2 %.

### Предел текучести по уровню деформации 0.2%

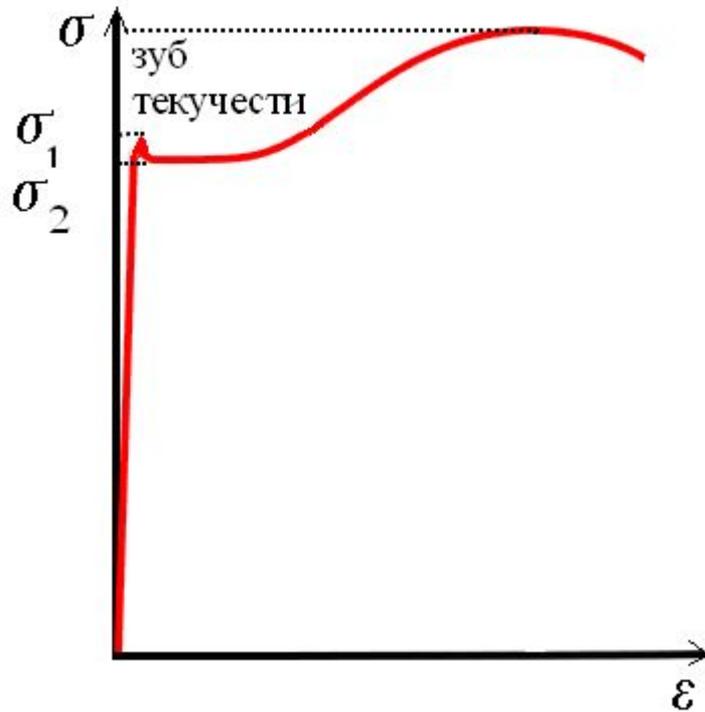


$$\sigma_{0,002}$$

Проводится линия, параллельная упругой части кривой **напряжение-деформация (НД)** из точки  $\varepsilon = 0.002$ .

$\sigma_{0,002}$  - это напряжение, соответствующее точке пересечения построенной линии и кривой **НД** (40 МПа).

# Существует большое число видов нагрузочных кривых



Например, для некоторых видов низколегированных сплавов (например, низкоуглеродистых сталей) кривая **НД** выявляет **двойной предел текучести (зуб текучести)**.

Это связано с тем, что в первоначальном состоянии вокруг имеющихся дислокаций скапливаются кластеры атомов внедрения. При приложении небольших нагрузок дислокации вынуждены двигаться вместе с ними, что тормозит процессы скольжения.

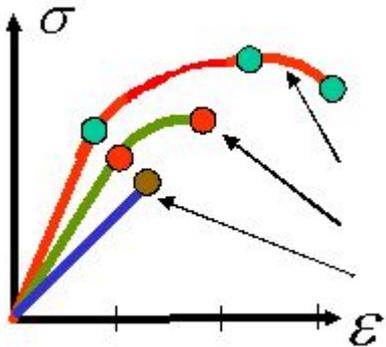
Только после приложения большего напряжения происходит отрыв дислокаций от точечных дефектов, и дислокации начинают скользить более легко.

# Материалы можно классифицировать по степени пластичности

**Пластичность** характеризуется относительным остаточным продольным удлинением и поперечным сужением. Часто их выражают в процентах.

$$\varepsilon_{ост} = \frac{l - l_0}{l_0} \qquad \psi_{ост} = \frac{A_0 - A}{A_0}$$

**Пластичный материал** имеет значительную область пластического течения на нагрузочной кривой и  $\varepsilon_{ост} > 10\%$



**Малопластичный материал**  $\varepsilon_{ост} \approx 5 \div 10\%$

У **хрупкого материала** нет области пластического течения  $\varepsilon_{ост} < 5\%$

Для хрупкого материала все основные характеристики: **предел текучести, предел прочности и предел разрушения** совпадают.

## Кривая истинное напряжения – истинная деформация

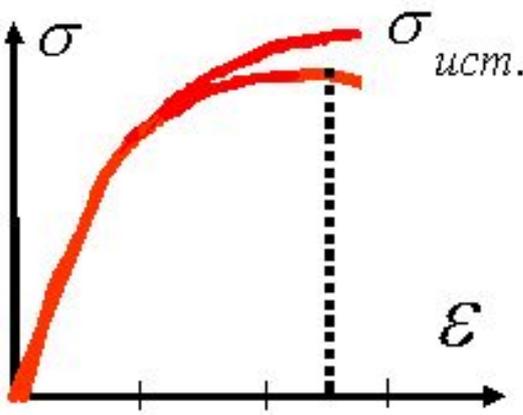
Условное напряжение  $\sigma$  определяется при постоянной площади поперечного сечения, и поэтому нагрузочная кривая имеет нисходящий участок.

В действительности же площадь поперечного сечения уменьшается.

Поэтому вводят так называемое **истинное напряжение** как отношение нагрузки **F** к текущему значению площади поперечного сечения **A**:  $\sigma_{ист} = F / A$

**Истинная деформация**

$$\varepsilon_{ист} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A}$$



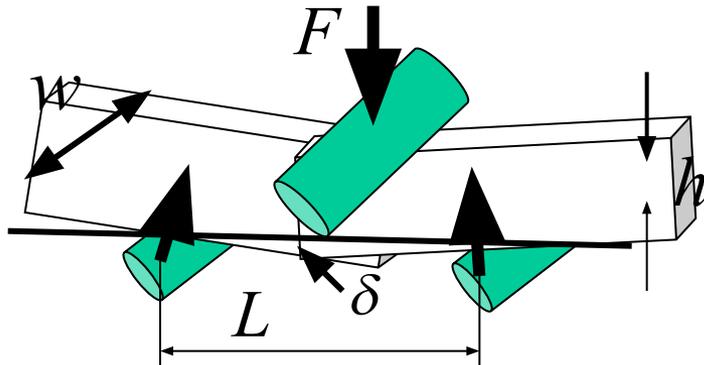
определяется из условия постоянства объема

$$l_0 A_0 = l A = V = const$$

## 2. Изгибные испытания для хрупких материалов

Обычные тесты на растяжение не могут быть использованы для многих хрупких материалов, потому что:

1. **Присутствие трещин** на поверхности приводит к разрушению;
2. **Закрепление концов** хрупкого образца **в зажимах** растягивающего устройства приводит к растрескиванию.



Поэтому для хрупких материалов используют изгибные испытания

Существует несколько стандартных видов изгибных испытаний.

Например, изгиб может вызываться нагрузкой, прикладываемой в 3 точках.

**Предел прочности на изгиб**

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{L}{wh^2} F$$

$L$  - расстояние между 2 внешними точками

$w$  - ширина пластинки

$h$  - высота пластинки

$F$  - величина разрушающей нагрузки

## Сравнение пределов прочности на растяжение, сжатие и изгиб (в МН/м<sup>2</sup>)

Материал	Растяжение	Сжатие	Изгиб
Стекловолокно 50% полиэстера	160	225	315
$Al_2O_3$	210	2625	350 175
$SiC$	3920		560

Хрупкие материалы  $Al_2O_3$  ,  $SiC$  разрушаются при много больших значениях сжимающих напряжений, чем растягивающих, поскольку трещины при сжатии закрываются.

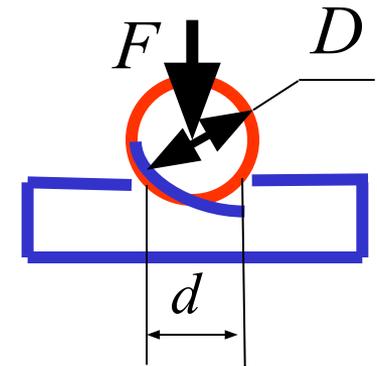
# 3. Определение твердости

Под **ТВЕРДОСТЬЮ** понимают способность материала сопротивляться **поверхностному вдавливанию** или **царапанию**. Например, алмаз является очень твердым материалом, который легко царапает стекло.

В технике используются различные испытания на твердость, наиболее широко применяются **тесты Бринелля, Виккерса и Роквелла**.

## 3.1. Тест Бринелля

Твердый шарик, сделанный из закаленной стали или карбида вольфрама, впрессовывается в поверхность образца в течение стандартного времени (10-15 с) при стандартной нагрузке  $F$ . Затем измеряется диаметр отпечатка  $d$ . По определению, **число твердости по Бринеллю** (**НВ** от «hardness Brinell») есть



1 кгс=9.8 Н

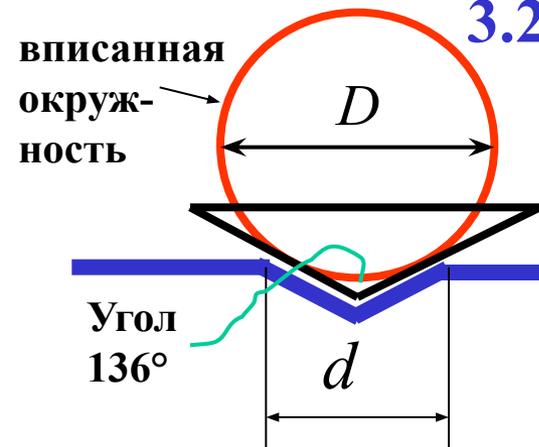
$$HB = \frac{\text{Прилож. нагрузка (кгс)}}{\text{Площ. п-ти отпечатка (мм}^2\text{)}} = \frac{F}{\frac{\pi D}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Для различных материалов выбираются различные инденторы и нагрузки.

Так, для стального шарика обычно используется диаметр 10 мм.

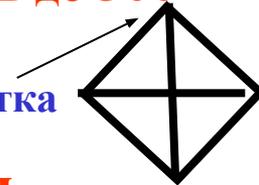
Для стали рекомендуется  $F/D^2 = 30$  следовательно, требуется нагрузка **3000 кгс**

## 3.2. Тест Виккерса



Индентор представляет собой алмазную пирамидку с квадратным основанием. Для расчета  $HV$  (число твердости по Виккерсу от «hardness Vickers») используется та же формула, что и для  $HB$ . Угол в вершине пирамиды обычно выбирают равным  $136^\circ$ , потому что при этом получается  $HB=HV$  вплоть до 300

Вид отпечатка  
сверху



### Преимущества теста Виккерса по ср. с тестом Бринелля

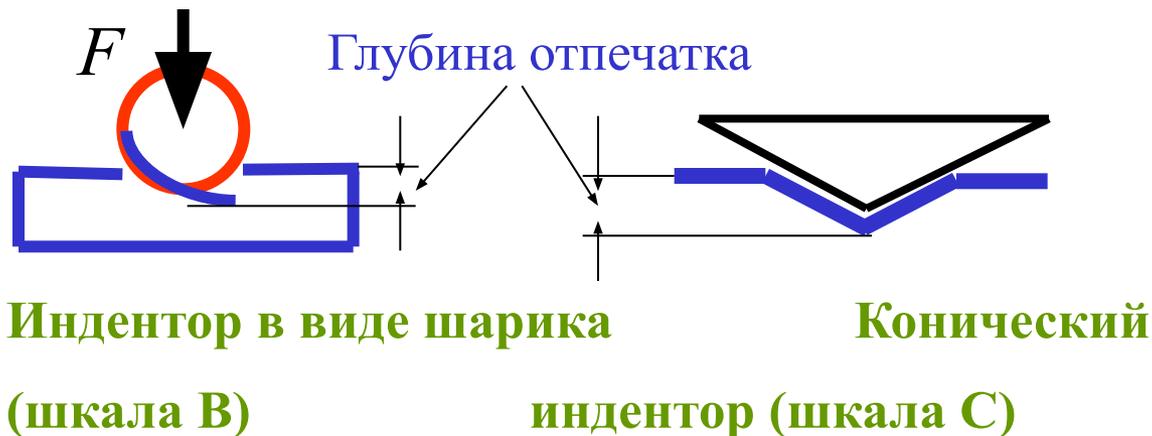
1. Применим даже для очень твердых материалов (поскольку используется алмазный индентор).
2. Обеспечивается высокая точность в линейной зависимости: материал с  $HV=400$  действительно в два раза тверже, чем с  $HV=200$

### Недостатки:

1. Отпечаток сравнительно мал по величине, поверхность должна быть отполирована и перпендикулярна индентору в течение всего времени испытания.
2. Испытание требует достаточно большого времени.

### 3.3. Тест Роквелла

Тест Роквелла измеряет **глубину проникновения** (а не диаметр или диагональ отпечатка)



### Преимущества теста Роквелла

1. Этот **тест проводится быстро** и, таким образом, именно он в основном применяется для обеспечения контроля качества деталей на движущемся конвейере.

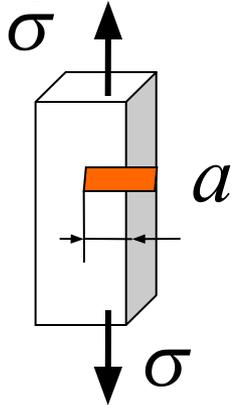
2. Может использоваться для исследования не очень гладких поверхностей. Чтобы приспособиться к неровностям поверхности, сначала прикладывается **незначительная нагрузка** для того, чтобы индентор не скользил по поверхности. Затем прикладывается **основная нагрузка** и производится измерение глубины проникновения.

# Сравнение различных тестов твердости

	<b>Индентор:</b>	<b>Нагрузка:</b>	<b>Применение:</b>
<b>Бринелля</b>	Шарик диаметром 1-10 мм , сделанный из стали или карбида вольфрама	F до 3000 кгс, зависит от отношения $F/D^2$	Сплавы черных и цветных металлов. Сплавы, керамики.
<b>Виккерса</b>	Алмазная пирамидка с квадратным основанием	F~1-120 кгс	Необходима подготовка поверхности
<b>Роквелла шкала В</b>	Стальной шарик диаметром 1/16 дюйма	10 кгс вспомогательная 100 кгс основная	Стальные сплавы низкой твердости до $HV=240$
<b>Роквелла шкала С</b>	Алмазный конус	10 кгс вспомогательная 150 кгс основная	Стальные сплавы высокой твердости $HV=240-1000$

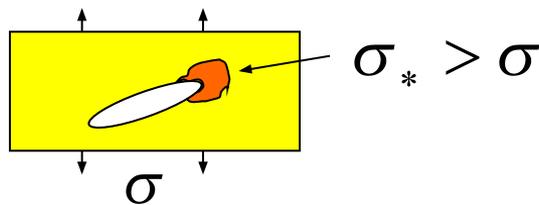
## 4. Трещиностойкость

Этот критерий относится к материалам, содержащим трещины или иные нарушения сплошности. Трещиностойкость – это способность трещиноватого материала не разрушаться при приложенной нагрузке.



Испытание на трещиностойкость выполняется приложением растягивающих напряжений к образцу стандартного размера со щелью известного размера и стандартной геометрии.

Разрушение трещиноватого образца происходит следующим образом. Вблизи трещин напряжение увеличивается (вследствие уменьшения площади, на которую приходится сила).

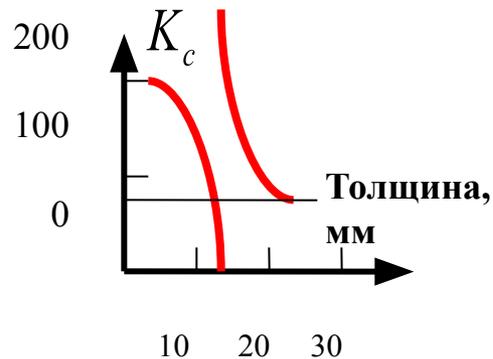


**Коэффициент усиления напряжения:**

$$K = f \sqrt{\pi a} \sigma$$

Его размерность  $[K]=\text{МН}/\text{м}^{3/2}$ .

Здесь  $f$  – геометрический коэффициент, он зависит от геометрии образца и щели,  $a$  – характерный размер щели,  $\sigma$  – приложенное напряжение.



$K = K_c$  - критическое значение

При его достижении начинается рост трещины, который приводит к разрушению.

Для тонких образцов  $K_c$  зависит от толщины образца. Для очень толстых образцов он не зависит от толщины и определяется только свойствами материала.

## Способность материала сопротивляться росту трещин зависит от большого числа факторов.

1. **Большие трещины** уменьшают допустимые напряжения и являются **более опасными**.
2. В пластичных металлах **острые концы трещин сглаживаются** вследствие пластической деформации, что предотвращает рост трещин. **Возрастание прочности** обычно приводит к **уменьшению пластичности**, и **трещиностойкость** понижается. Хрупкие материалы (например, керамики) имеют меньшую **трещиностойкость**, чем металлы.
3. **Более толстые и жесткие образцы** имеют **меньшую трещиностойкость**.
4. Возрастание **скорости нагружения** уменьшает **трещиностойкость**.
5. **Возрастание температуры** увеличивает **трещиностойкость**, поскольку материал становится более пластичным.
6. Малость зерен улучшает **трещиностойкость**, а точечные дефекты и дислокации ухудшают ее.

Те же параметры могут измеряться при достаточной большой скорости нагрузки – в динамическом режиме.

Но в основном при динамической нагрузке определяют выносливость и ударную вязкость.

## Динамические тесты

### 5. Испытания на усталость

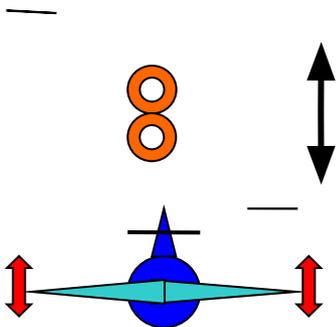
Усталость металла – процесс постепенного накопления повреждений под действием повторно-переменных напряжений.

Выносливость-это свойство противостоять усталости. Выносливость характеризуется рядом параметров, среди которых – **предел выносливости** и **циклическая долговечность**.

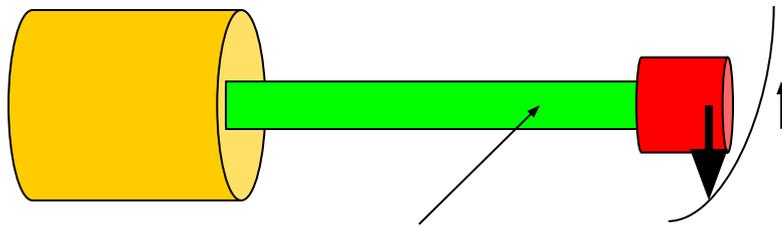
Даже если напряжение ниже порога прочности, материал может разрушиться, если оно приложено многократно.

Хорошо известный пример: **многократным изгибом медной или алюминиевой проволоки** можно их разломать.

После нескольких циклов нагрузки возникает очень маленькая трещина. Затем она растет, распространяется, и образец внезапно ломается. Усталостное разрушение может быть ответственно за разрушение крыльев старых самолетов из-за длительной вибрации.

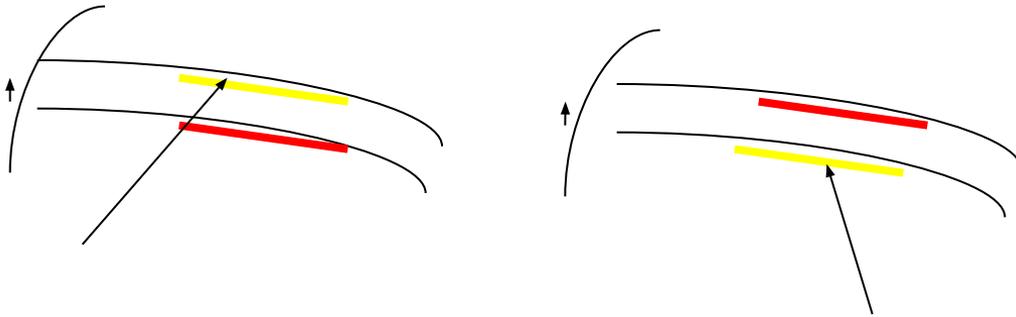


**Вращательное испытание бруска под нагрузкой** более удобно при усталостных испытаниях, поскольку обеспечивает многократный изгиб образца технически более легко реализуемым вращением.



Один конец цилиндрического образца прикрепляется к мотору, другой вращается в подшипнике. Второй конец нагружается, и образец слегка изгибается.

Мотор Вращающийся образец Нагрузка

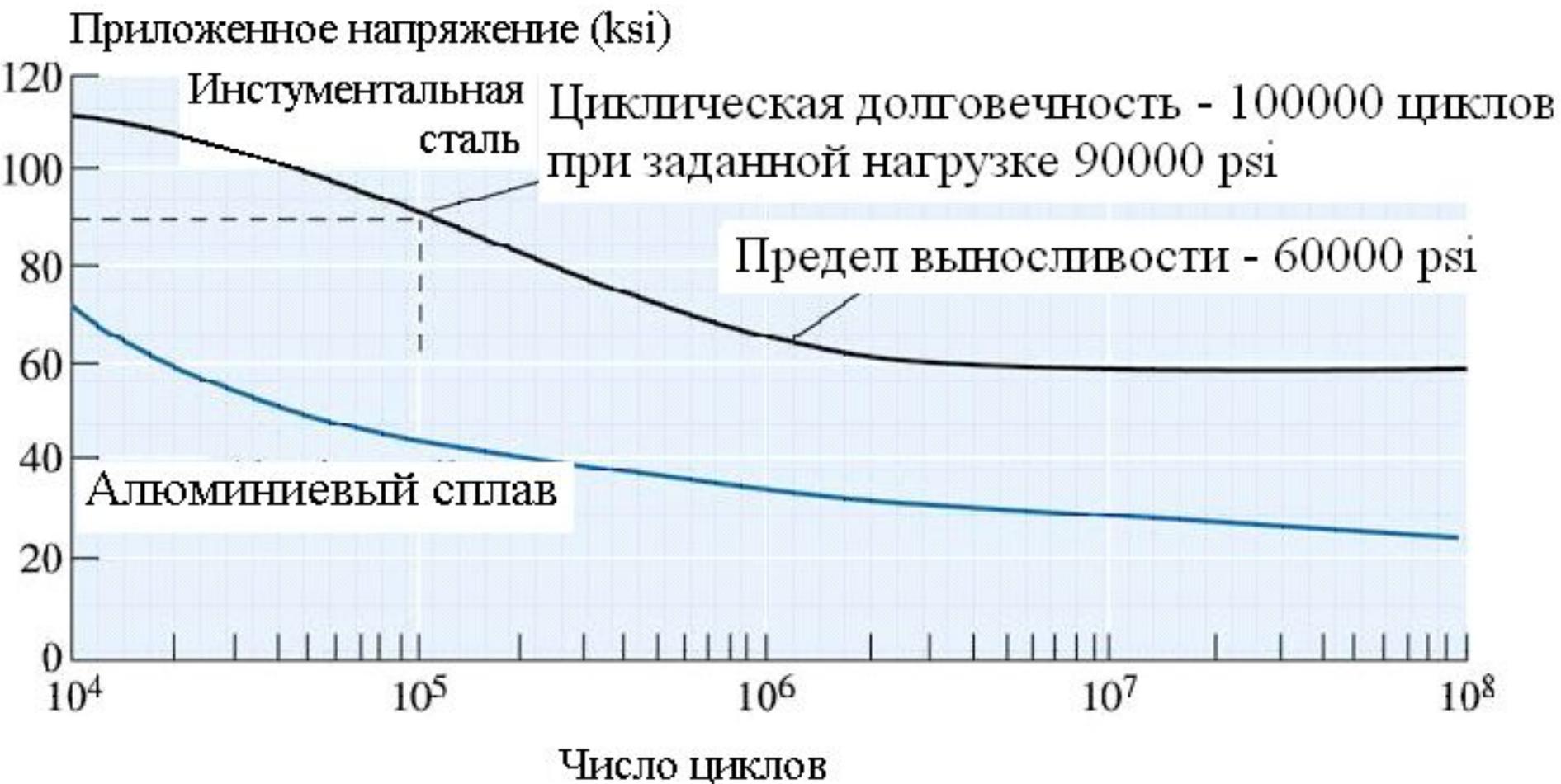


Часть материала, которая сначала испытывала растяжение, после поворота на  $180^\circ$  будет испытывать сжатие.

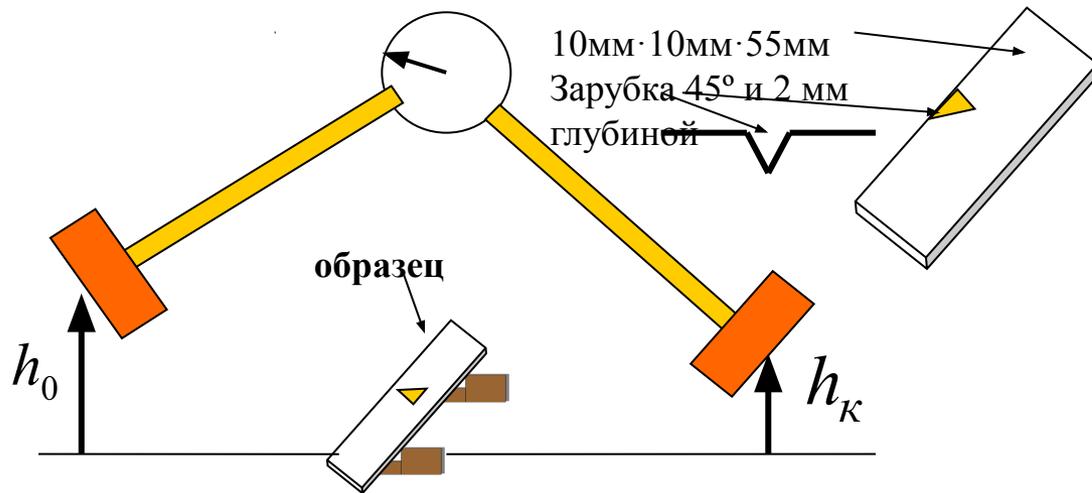
Существует несколько критериев выносливости.

**Циклическая долговечность**- число циклов, которое образец выдерживает до разрушения при заданной нагрузке.

**Предел выносливости** – напряжение, соответствующее началу горизонтального плато (оно имеется не у всех материалов).



## 6. Испытания на ударную вязкость



Чем больше работа разрушения,  
тем больше так называемая  
**ударная вязкость  $KC$** :

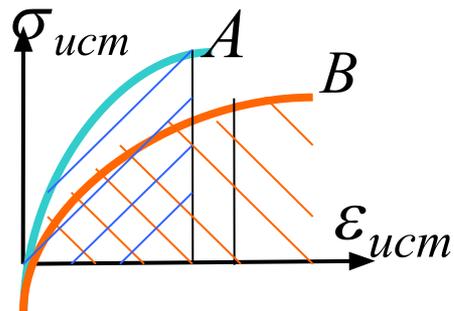
$$KC = A / S_0$$

где  $S_0$  - площадь поперечного сечения образца в месте удара.

Принципиальным отличием тестов на растяжение и ударный изгиб является скорость нагружения: при большей скорости материал становится более хрупким.

Тяжелый маятник начинает опускаться с высоты  $h_0$ . Образец размещается на пути маятника на двух опорах и разрушается. Часть кинетической энергии маятника расходуется на изгиб и разрушение образца, и конечная высота его подъема  $h_k$ . Разность начальной и конечной потенциальной энергии называют “работой разрушения”.

На практике измеряют угол отклонения маятника.



**Работа пропорциональна площади под кривой истинное напряжение - истинная деформация.**

**Например, материал В имеет меньший предел текучести, но большую длину площадки текучести. За счет этого для него площадь под кривой, работа разрушения и вязкость больше, чем для материала А.**

**Для высокой вязкости должны быть высокими значения и пластичности, и прочности.**

**Это достаточно редкий и высокоценный набор свойств. Обычно пластичные материалы менее прочны, а прочные менее пластичны.**

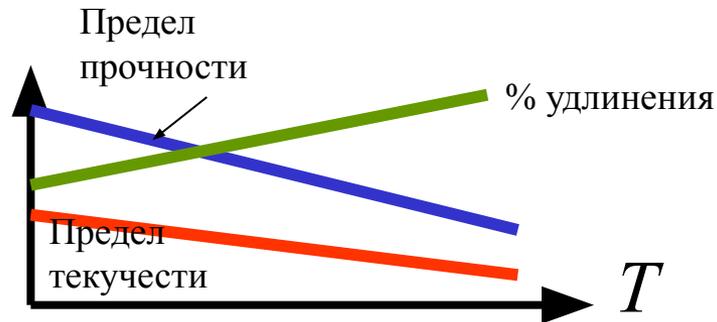
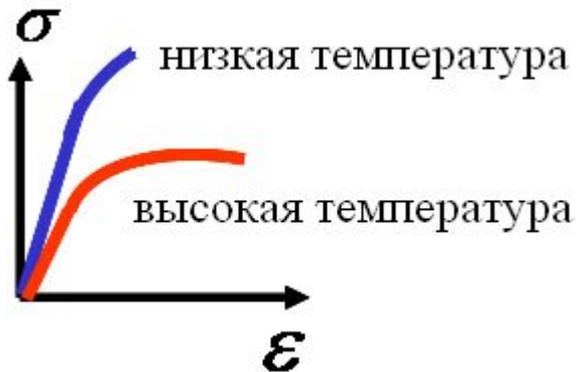
**Например, керамики и композиты имеют низкую вязкость, несмотря на высокую прочность (из-за малой пластичности).**

**Материалы с высокой вязкостью используются, например, для изготовления брони танков.**

# Зависимость механических свойств от температуры

От **температуры** зависят как упругие, так и другие механические свойства.

При повышении температуры материалы становятся более пластичными, а при понижении- хрупкими. Увеличение пластичности при повышении температуры используется при **термической обработке**

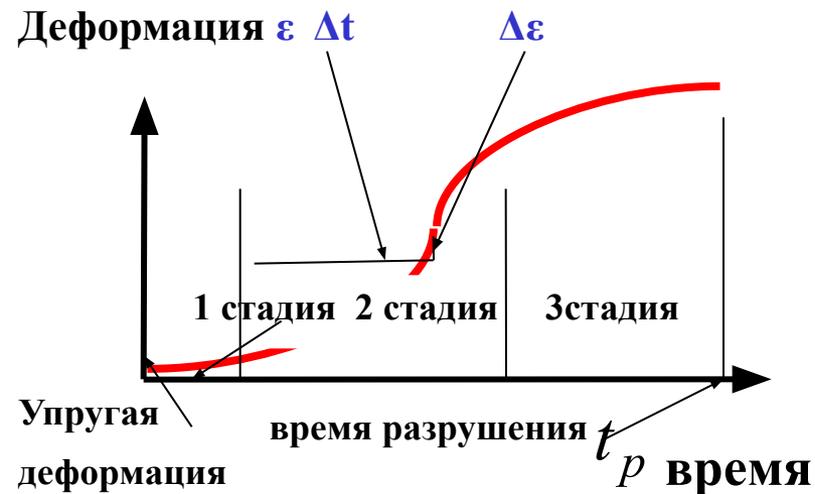


**При понижении температуры падает также ударная вязкость.**



## 7. Испытания на ползучесть

Ползучесть-это деформация образца при небольшом постоянном приложенном напряжении. При высокой температуре даже в том случае, если напряжение много меньше предела текучести, образец вследствие ползучести может растягиваться вплоть до разрыва. Испытания на ползучесть проводятся при постоянной температуре и внешней нагрузке. Измеряются **время разрушения и скорость ползучести**.



Различают 3 стадии ползучести.

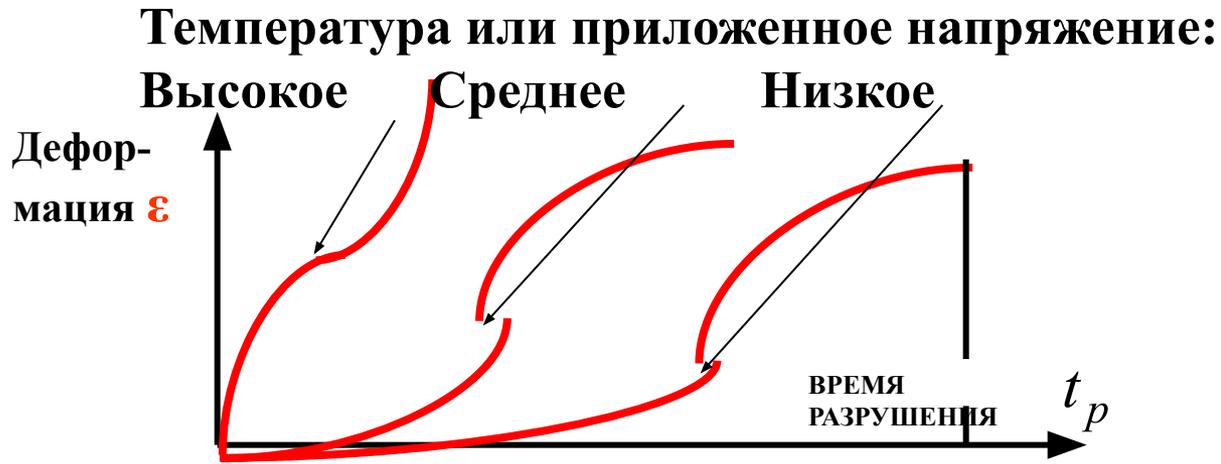
По мере приложения нагрузки образец сначала упруго растягивается

На **1 стадии** дислокации начинают двигаться, и их движение приводит к пластическому удлинению образца. Однако, это движение дислокаций (**скольжение**) останавливается препятствиями (несовершенствами кристаллической решетки).

На **2 стадии** дислокации отрываются от препятствий, но скорость отрыва равна скорости остановки другими несовершенствами. Здесь имеет место установившаяся скорость удлинения: **скорость ползучести**=  $\Delta \text{деформация} / \Delta \text{время} = \Delta \epsilon / \Delta t$ .

В течение **3 стадии** начинает формироваться шейка и образец деформируется с возрастающей скоростью вплоть до разрушения.

# Ползучесть растет с повышением как температуры, так и напряжения.



Существуют различные модели ползучести.

Во многих материалах комбинированное воздействие напряжения и температуры на **скорость ползучести** и **время разрушения** определяется законом Аррениуса:

$$\frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = C \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad t_r = K \sigma^m \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right)$$

Здесь **C**, **n** и **K**, **m** – постоянные материала,

$Q_c$  - энергия активации ползучести,

$Q_r$  - энергия активации разрушения.

На практике часто важно знать время разрушения  $t_r$

Оно зависит от двух параметров: нагрузки и температуры. Поэтому сначала проводят серию тестов при различных нагрузках и температурах. Для удобства представления можно объединить время и температуру в один параметр. Для этого прологарифмируем формулу  $t_r = K\sigma^m \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right)$

Выразим  $\ln \sigma$  через  $T$  и  $t_r$

Сгруппируем слагаемые, содержащие  $T$  и  $t_r$ .

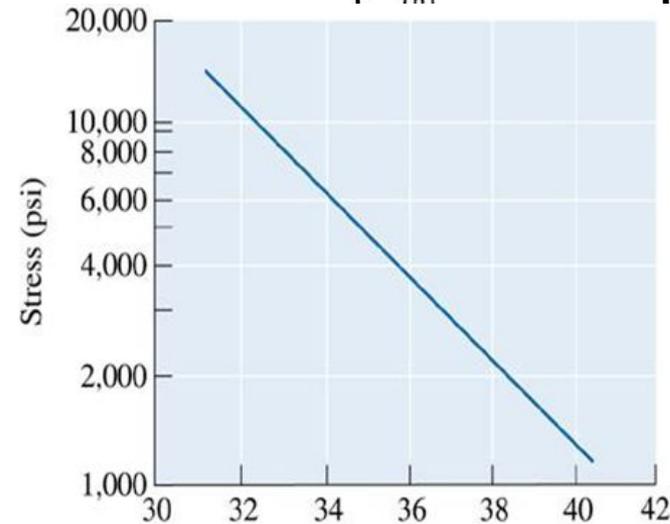
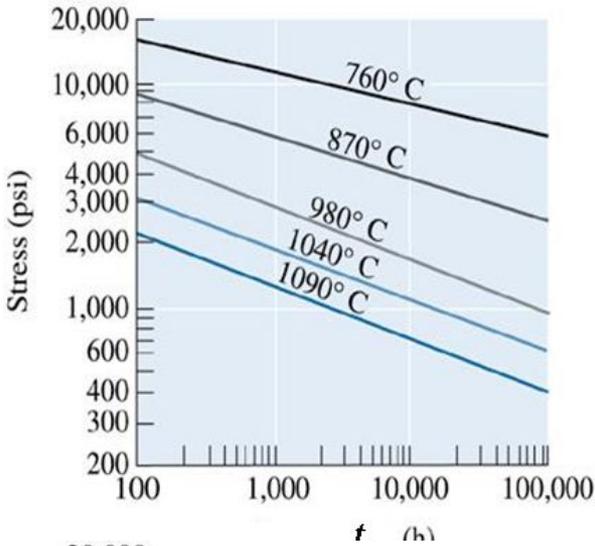
Получится выражение вида:

$$P_{LM} = (0.001T(A + B \ln t_r))$$

Его называют температурно-временным параметром Ларсона-Миллера.

Здесь время  $t$  измеряется в часах,  $A$  и  $B$  - константы.

Существует несколько видов параметра Ларсона-Миллера (логарифм может быть десятичным или натуральным, а температура может измеряться в градусах Кельвина или Ранкина  $t(^{\circ}Ra) = \frac{9}{5}t(^{\circ}C) + 492$ )



$$P_{LM} = (0.001T(36 + 0.78 \ln t_r))$$

Далее строят зависимость нагрузки (в логарифмических координатах) от этого параметра.