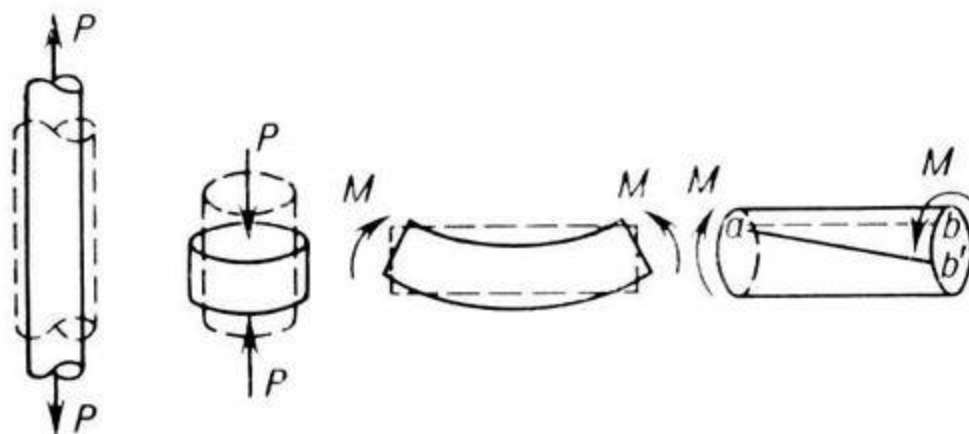


Механические свойства металлов и сплавов

Механические свойства это – свойства металлов (материалов) сопротивляется действию внешней нагрузки.

Схемы нагружения



Основоположники металловедения:

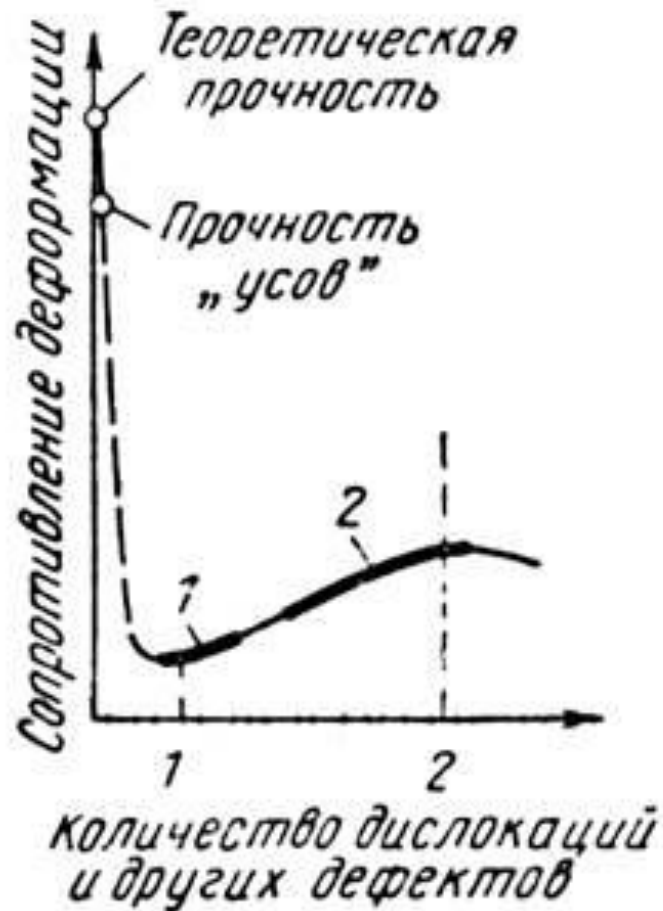
Павел Петрович Аносов (1799-1851 гг.).

- Открыл секрет булатной стали;
- в 1831 г. Применил микроскоп для изучения строения металла;
- Установил связь между структурой и свойствами;
- в 1836 первая лаборатория механических испытаний на Златоустовском железоделательном заводе;
- Первым получил и изучал сплавы;

Дмитрий Константинович Чернов (1839-1921 гг.).

- Главный металлург Обуховского завода;
- открыл критические точки стали;
- разработал теорию кристаллизации слитка;
- разработал технологию центробежного литья, литья под давлением

Пути и способы изменения механических свойств металлов.
Схема А.А. Бочвара-И.А. Одингга



Механические испытания, как средство оценки качества металла

Оценить качество металла можно по результатам:

- Лабораторных испытаний;
- Стендовых испытаний;
- Натурных испытаний.

Подходы к изучению механических свойств:

1. Прикладная механика.
2. Физика твердого тела.
3. Металловедение.
4. Физико-химическая механика материалов.

Факторы, влияющие на механические свойства:

1. От вида материала.
2. Конструктивный фактор.
3. Условия нагружения.

Цели проведения механических испытаний:

1. Предварительная оценка механических характеристик.
2. Для установления связи между механическими характеристиками и меняющимися параметрами обработки.
3. Как контрольные мероприятия в массовом производстве.

Классификация механических испытаний:

По способу нагружения образца:

Используют два способа нагружения:

1. Путем его деформации с заданной скоростью и измерением сил сопротивления образца этой деформации;
2. Подачей постоянной нагрузки (напряжения) на образец с измерением возникающей при это деформации (испытание на ползучесть).

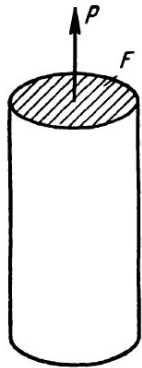
Механические испытания, в которых нагрузка непостоянна, классифицируют по характеру изменения нагрузки во времени:

- Статические
- Динамические
- Циклические.

Определение некоторых механических характеристик может проводиться в различных условиях.

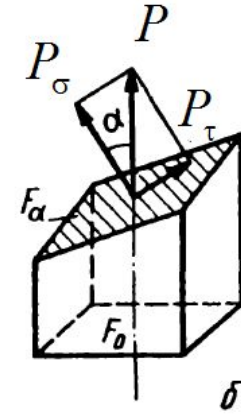
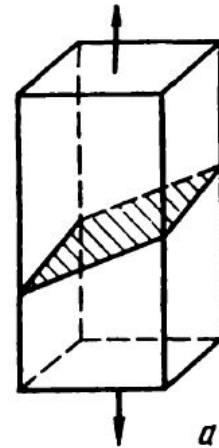
Напряжения

Напряжения, возникающие в металле при его нагружении:



$$\sigma = \frac{P}{F}, \text{ кг / мм}^2$$

Схема определения напряжения



Схемы определения составляющих полного напряжения

Истинное нормальное напряжение:

$$S = \frac{P_\sigma}{F_\alpha} = \frac{P \cdot \cos^2 \alpha}{F_0} \quad \text{при } \cos 0^\circ = 1 \rightarrow S_{\max}$$

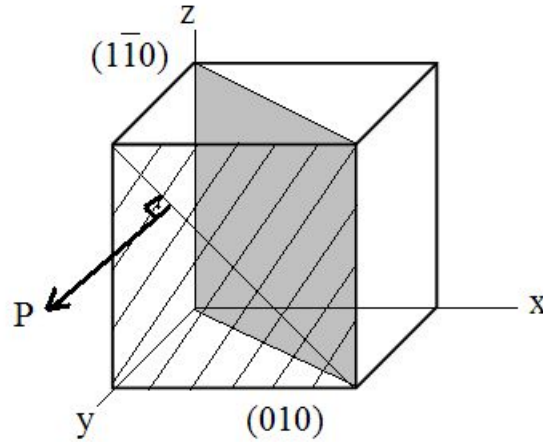
Истинное касательное напряжение:

$$t = \frac{P_\tau}{F_\alpha} = \frac{P \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}{F_0} = \frac{P \cdot \sin 2\alpha}{2F_0}$$

$$\cos 90^\circ = 1 \quad \alpha = 45^\circ \longrightarrow t_{\max}$$

$$\text{Даже при } \alpha = 45^\circ \quad t_{\max} = \frac{1}{2} S_{\max}$$

При нагружении кристаллического образца в разных кристаллографических плоскостях будут возникать нормальные (S) и касательные (t) напряжения:



В плоскости (010) возникнут S_{\max}
 В плоскости $(1\bar{1}0)$ возникнут t_{\max}

Принято различать:

Условные нормальные напряжения

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_0}$$

Истинные нормальные напряжения

$$S_i = \frac{P_i}{F_i}$$

Условные касательные напряжения

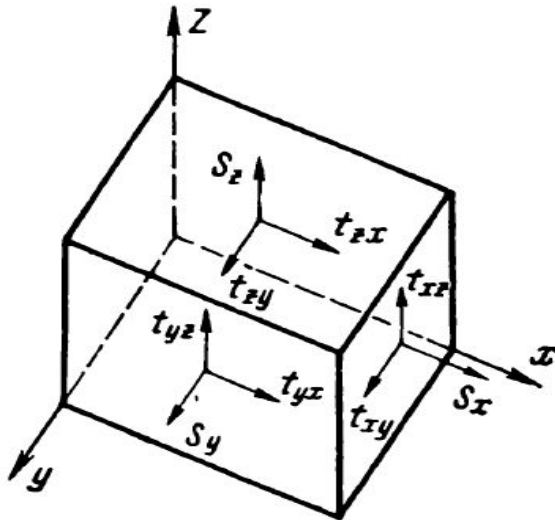
$$\tau_i = \frac{P_{\tau i}}{F_0}$$

Истинные касательные напряжения

$$t_i = \frac{P_{\tau i}}{F_i}$$

Тензор напряжений

Представление о тензоре напряжений используется тогда, когда нужно определить напряжение, действующее в любом сечении твердого тела.



Параллелепипед находится под действием девяти напряжений:

- трех нормальных (S_x, S_y, S_z)
- шести касательных ($t_{xy}, t_{xz}, t_{yx}, t_{yz}, t_{zx}, t_{zy}$).

Совокупность этих напряжений и есть тензор напряжений, который записывается как:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_x & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & S_y & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & S_z \end{pmatrix}$$

Для равновесия параллелепипеда необходимо равенство моментов относительно координатных осей. Поэтому:

$t_{xy} = t_{yx}, t_{xz} = t_{zx}, t_{yz} = t_{zy}$ (закон парности касательных напряжений).

На взаимно перпендикулярных плоскостях будут действовать только нормальные напряжения

$$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$$

- S_1 - максимальное нормальное напряжение;
- S_2 - среднее нормальное напряжение;
- S_3 - минимальное нормальное напряжение.

Деформации. Тензор деформаций

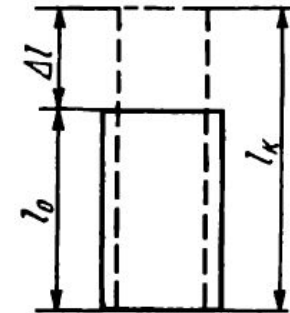
По результатам механических испытаний оценивают различные характеристики упругой, а чаще остаточной (пластической) деформации.

Наиболее широко используют следующие характеристики деформации: удлинение (укорочение), сдвиг и сужение (уширение) образцов.

Увеличение длины образца в результате деформации обычно характеризуют относительным удлинением δ , %:

$$\delta = \frac{(l_k - l_0)}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$$

где l_0 и l_k начальная и конечная длины; Δl - абсолютное удлинение.

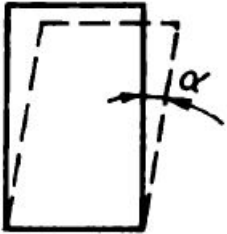


Истинное относительное удлинение: $e = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_k}{l_0}\right)$

Разница между δ и e растет с увеличением степени деформации. При $\sigma=25\%$ $e=\ln 1,25=22\%$, а при $\delta=100\%$ $e=\ln 2 \sim 69\%$. В области малых деформаций $\delta \sim e$.

Деформации. Тензор деформаций

Удлинение и укорочение образца обычно происходят под действием нормальных напряжений. Касательные напряжения вызывают сдвиговые деформации, которые оценивают по углу сдвига α (в радианах) или по величине относительного сдвига $q = \operatorname{tg}\alpha$.



Совокупность удлинений и сдвигов - тензор деформации - по аналогии с тензором напряжений характеризует любое деформированное состояние в данной точке и позволяет определять e в любом направлении и q в любой плоскости.


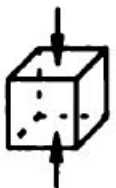
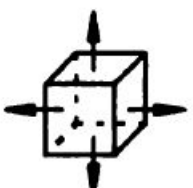
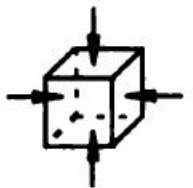
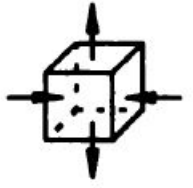
В общем случае тензор деформаций характеризуется девятью компонентами - тремя удлинениями и шестью сдвигами:

$$(q) = \begin{bmatrix} e_x & q_{xy} & q_{xz} \\ q_{yx} & e_y & q_{yz} \\ q_{zx} & q_{zy} & e_z \end{bmatrix}$$

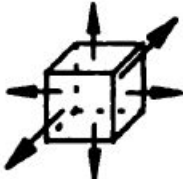
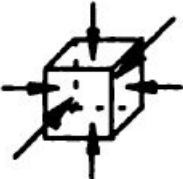
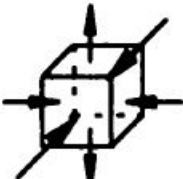
В случае, если три главных направления деформации (в которых сдвиги равны нулю) заранее известны:

$$(q) = \begin{bmatrix} e_x & 0 & 0 \\ 0 & e_y & 0 \\ 0 & 0 & e_z \end{bmatrix}$$

Схемы напряженного и деформированного состояния при механических испытаниях различных видов (по Я.Б. Фридману)

Напряженное состояние		Схема напряженного состояния	Тензор напряжений	Примеры реализации
Линейное	Одноосное растяжение		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0$	Испытание на растяжение образцов без надреза (до образования шейки)
	Одноосное сжатие		$(S) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_3 < 0$	Испытания на сжатие (при отсутствии трения на торцовых поверхностях)
Плоское	Двухосное растяжение		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0, \quad S_2 > 0$	Изгиб широкого образца ($4S_2 \approx S_1$). Растяжение и изгиб листовых образцов с надрезом и трещиной (у вершины трещины)
	Двухосное сжатие		$(S) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_2 < 0, \quad S_3 < 0$	Кольцевое сжатие образцов по боковой поверхности ($S_3 = S_2$)
	Разноименное плоское напряженное состояние		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0, \quad S_3 < 0$	Кручение цилиндрического стержня ($S_1 = -S_3$)

Схемы напряженного и деформированного состояния при механических испытаниях различных видов (по Я.Б. Фридману)

Напряженное состояние		Схема напряженного состояния	Тензор напряжений	Примеры реализации
Объемное	Трехосное растяжение		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0, S_2 > 0, S_3 > 0$	<p>Гидростатическое растяжение в центре нагреваемого шара ($S_1 = S_2 = S_3$).</p> <p>Растяжение цилиндрического образца с кольцевым надрезом (в центральных зонах, где $S_1 > S_2, S_2 \approx S_3$). Растяжение и изгиб образцов с надрезом и трещиной (у вершины трещины)</p>
	Трехосное сжатие		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_1 < 0, S_2 < 0, S_3 < 0$	<p>Гидростатическое сжатие. Испытание на твердость вдавливанием индентора</p>
	Разноименное объемное напряженное состояние		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0, S_2 < 0, S_3 < 0$ <p style="text-align: center;">или</p> $S_1 > 0, S_2 > 0, S_3 < 0$	<p>Растяжение образца с шейкой под гидростатическим давлением</p>

Оценка характера напряженного состояния

Характер напряженного состояния влияет на механические характеристики, особенно на характеристики пластичности через соотношение касательных и нормальных растягивающих напряжений. Чем больше доля касательных напряжений, тем мягче напряженное состояние.

Коэффициент мягкости:
$$\alpha = \frac{t_{\max}}{S_{\max}^n} \approx \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}}$$

где
$$t_{\max} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} ; \quad S_{\max}^n = S_1 - \mu(S_2 + S_3)$$

S_{\max}^n - истинное максимальное приведенное напряжение, действующее на площадках, где касательные напряжения равны нулю.

μ - коэффициент Пуассона, равный отношению относительной поперечной деформации к относительной продольной.

$$\mu = \frac{\delta_{\text{поперечн.}}}{\delta_{\text{продольн.}}}$$

$$\delta_{\text{поперечн.}} = \frac{d_0 - d_i}{d_0} \cdot 100\%$$

$$\delta_{\text{продольн.}} = \frac{l_i - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

Мягкость напряженного состояния

$t_{\max} > S_{\max}^n$ Начнется пластическая деформация и разрушение будет вязким.

$t_{\max} < S_{\max}^n$ Разрушение произойдет без заметной пластической деформации, путем хрупкого отрыва.

Чем больше коэффициент мягкости α , тем более благоприятны условия для развития пластической деформации.

Жесткость схемы напряженного состояния может быть охарактеризована также коэффициентом трехосности:

$$\beta = \frac{S_n}{|S_{\max}|}$$

Где S_n Среднее истинное нормальное напряжение, действующее на октаэдрических площадках:

$$S_n = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$$

$|S_{\max}|$ Наибольшее по модулю истинное нормальное напряжение.

$\beta = -1, \dots, 0, \dots, +1$ и чем этот коэффициент больше, тем труднее протекает пластическая деформация.

Вид испытания	Главные нормальные напряжения			α	β
	S_1	S_2	S_3		
Одноосное растяжение	S	0	0	$1/2$	$1/3$
Одноосное сжатие	0	0	$-S$	2	$-1/3$
Трехосное растяжение	S	S	$1/2 S$	$2/5$	$5/6$
Двухосное растяжение	S	S	0	$2/3$	$2/3$
Трехосное сжатие	$-S$	$-1/3 S$	$-1/3 S$	4	$-17/21$

Условия подобия механических испытаний

Большинство характеристик механических свойств металлов и сплавов не является их физическими константами. Они в сильной степени зависят от условий проведения испытаний.

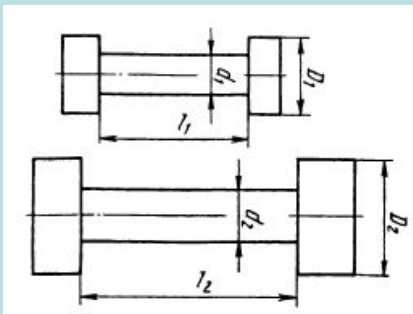
Условия, обеспечивающие постоянство и сопоставимость результатов, называются условиями подобия механических испытаний.

Для соблюдения условий подобия образцы следует подвергать испытаниям при одинаковой схеме напряженного состояния и в одинаковых физических условиях.

Условия подобия

1) геометрического
(форма и размеры
образца)

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad ; \quad \frac{l_1}{D_1} = \frac{l_2}{D_2}$$



2) механического (схема и скорость
приложения нагрузок);

Механическое подобие заключается в том, что в сходственных сечениях рабочей части образцов возникают тождественное напряженное состояние и одинаковая относительная деформация.

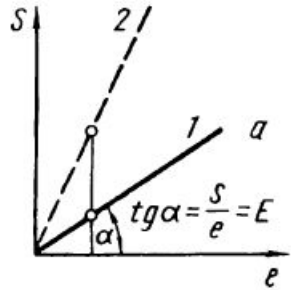
3) физического
(внешние физические
условия).

Сопоставление свойств разных металлических материалов более правильно проводить при одинаковых гомологических температурах, т. е. одинаковых отношениях абсолютных температур испытания и плавления $T_{исп}/T_{пл}$ (в градусах Кельвина).

Упругие свойства металлов

Сопротивление металла упруго деформации оценивают следующими характеристиками:

1)

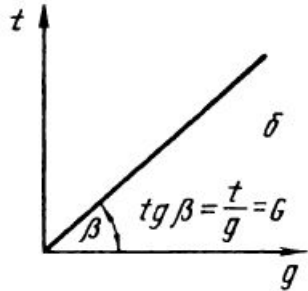


E - модуль нормальной упругости (модуль Юнга)

S - истинные нормальные напряжения; e - истинная деформация.

$$\operatorname{tg} \alpha_2 > \operatorname{tg} \alpha_1 \quad E_2 > E_1$$

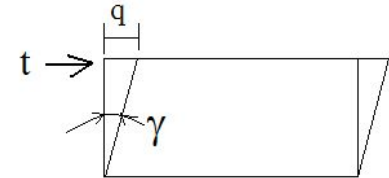
2)



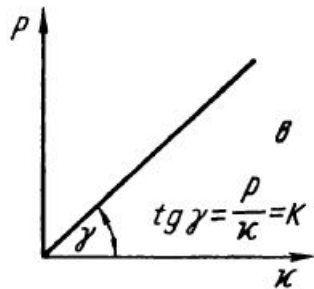
G - модуль сдвига. При кручении (сдвиге):

$$t = G \cdot q \quad \text{где} \quad G = \operatorname{tg} \beta$$

$$q - \text{относительный сдвиг.} \quad \operatorname{tg} \gamma = q$$



3)



K - модуль всестороннего сжатия (при гидростатическом сжатии).

$$P = K \cdot \chi \quad \text{где} \quad K = \operatorname{tg} \gamma$$

4)

Коэффициент Пуассона (μ):
$$\mu = \frac{\delta_{\text{поперечн.}}}{\delta_{\text{продольн.}}}$$

$$E = 2G(1 + \mu)$$

$$E = 3K(1 - 2\mu)$$

$$E = \frac{9KG}{3K + G}$$

Для сложного напряженного состояния закон Гука запишется следующим образом:

$$S = E \cdot e \longrightarrow e = \frac{S}{E} \quad \text{тогда} \quad \begin{cases} e_x = E^{-1} [S_x - \mu(S_y + S_z)] \\ e_y = E^{-1} [S_y - \mu(S_x + S_z)] \\ e_z = E^{-1} [S_z - \mu(S_x + S_y)] \end{cases}$$

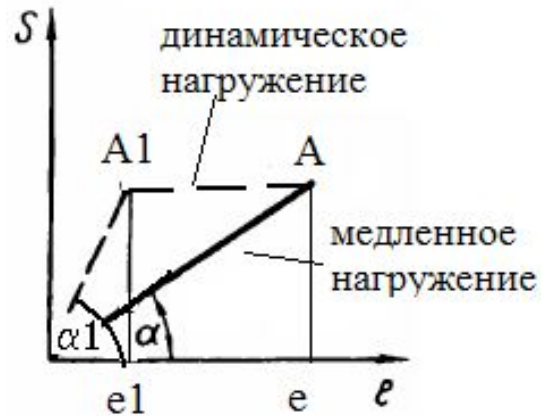
Константы упругости чистых поликристаллических металлов при комнатной температуре (А.И. Чижик)

Металл	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	$G \cdot 10^{-5}$, Мпа	$K \cdot 10^{-5}$, МПа	μ
Железо	2,17	0,89	1,72	0,28
Никель	2,05	0,78	1,87	0,31
Медь	1,25	0,46	1,42	0,34
Алюминий	0,72	0,27	0,75	0,34
Титан	1,08	0,41	1,27	0,34
Кобальт	2,04	0,76	1,87	0,31
Хром	2,40	0,90	1,94	0,30
Молибден	8,47	1,22	2,80	0,30
Цинк	0,94	0,37	0,62	0,29

Методы определения модуля нормальной упругости

Различают 2 модуля нормальной упругости:

- Релаксированный или изотермический (E_i);
- нерелаксированный или адиабатический (E_a).



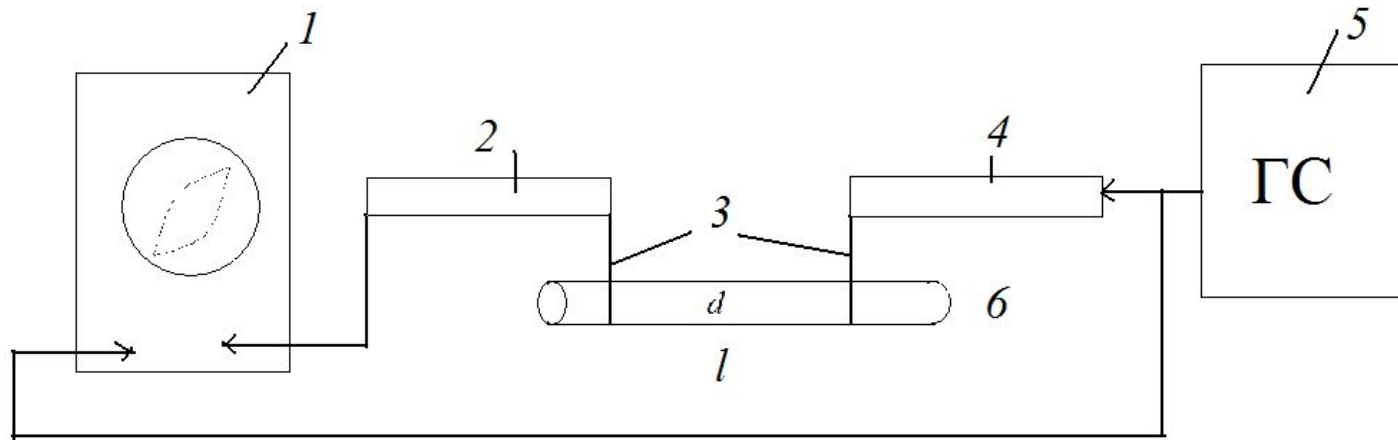
$$tg\alpha_1 > tg\alpha$$

$$E_a > E_i$$

ΔE - дефект модуля Юнга

E_i - определяется по результатам испытаний на статическое растяжение.

E_a - определяется резонансным (пьезоэлектрического возбуждения) методом – частота внутренних колебаний зависит от констант упругости.



- 1 – осциллограф;
- 2- датчик (пьезокристалл);
- 3 – упругие металлические нити;
- 4 – возбуждатель колебаний (пьезокристалл);
- 5 – генератор электрических сигналов;
- 6 - образец длиной l и диаметром d .

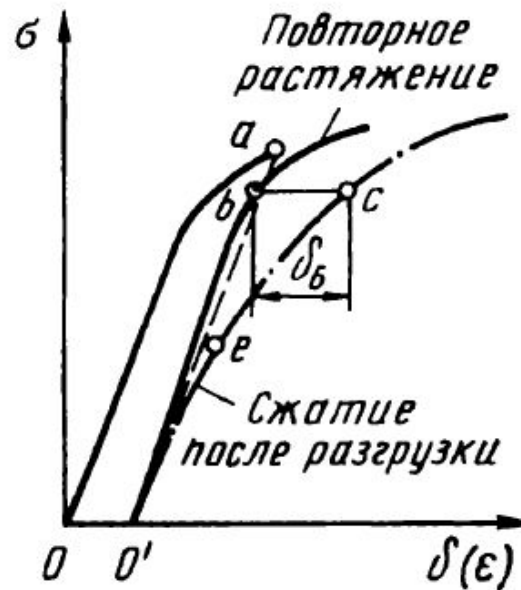
$$E_a = 1.6388 \cdot 10^{-5} \left(\frac{l}{d}\right)^4 \frac{P}{q \cdot l} \cdot f_r^2 \quad , \text{кГ/мм}^2$$

q – ускорение силы тяжести, см/сек^2 ; P – вес образца, г; f_r – резонансная частота, Гц.

Явления упругих несовершенств

В области упругой деформации, где действует закон Гука, у металлов и сплавов наблюдается ряд отклонений от чисто упругого поведения.

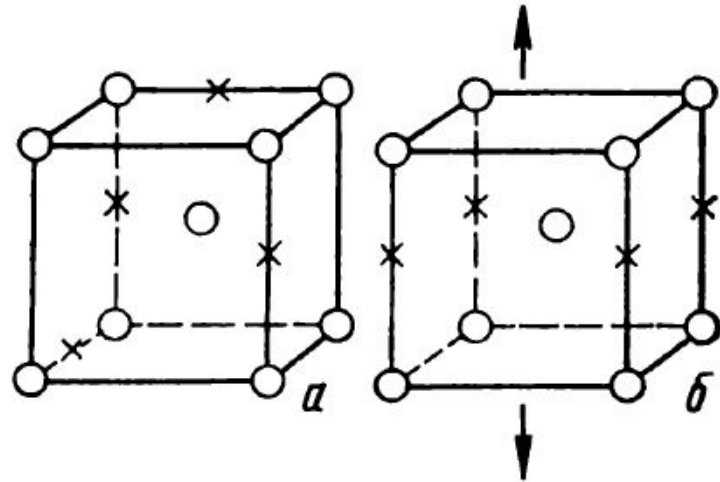
Эффект Баушингера



Упругое последствие



Схема упругого последствия



Перераспределение атомов примеси внедрения в О.Ц.К. металле под действием напряжения до (а) и после нагружения (б)

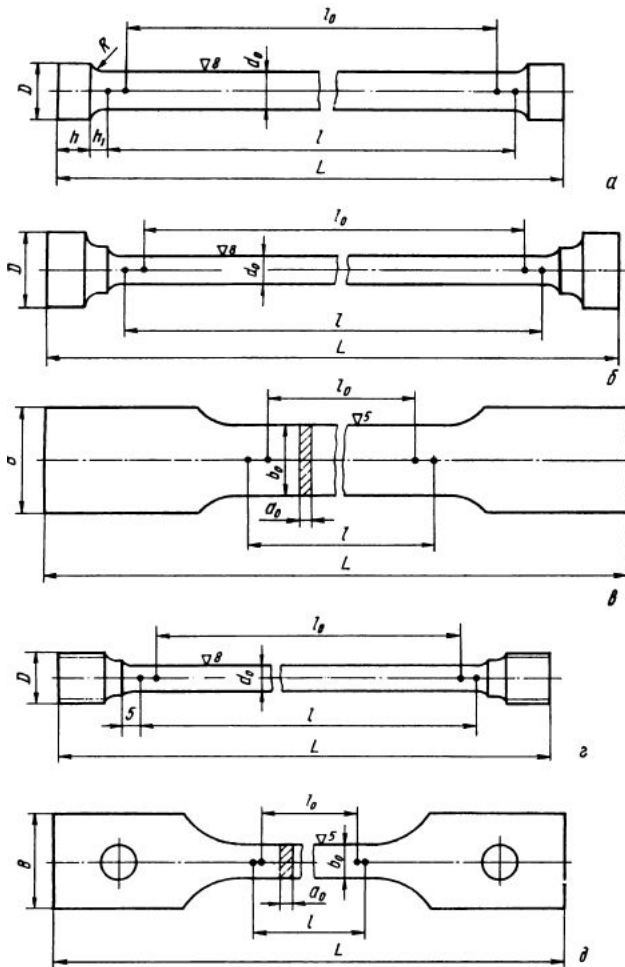
Упругое последствие может в ряде случаев проявляться на практике. Например, из-за него после деформационной правки или после сварки может возникать поводка изделий. Упругое последствие вызывает нежелательное увеличение деформации пружин и мембран, работающих под нагрузкой в точных приборах.

Скорость упругого последствия, а также его величина зависят от состава, структуры материала и условий его испытания. Увеличение гетерогенности структуры, неоднородность пластической деформации, облегчение ее под воздействием различных факторов усиливают эффект упругого последствия.

Свойства металлов при статических испытаниях

Испытание на растяжение

Методы испытания на растяжение стандартизованы. При комнатной температуре (ГОСТ 1497-84), при повышенных до 1473 К (ГОСТ 9651-84) и пониженных от 273 до 173 К (ГОСТ 11150-84) температурах. ГОСТ 11701-84 на растяжение тонких листов и лент (толщиной до 3 мм).



Комнатная температура

Повышенные и отрицательные температуры

Размеры образцов

- 1) рабочая длина l - часть образца между его головками или участками для захвата с постоянной площадью поперечного сечения;
- 2) начальная расчетная длина l_0 - участок рабочей длины, на котором определяется удлинение;
- 3) начальный диаметр рабочей части d_0 для цилиндрических или начальная толщина a_0 и ширина b_0 рабочей части для плоских образцов.

Между размерами образца должны существовать определенные соотношения:

- рабочая длина цилиндрических образцов должна быть

от $l_0 + 0,5d_0$ до $l_0 + 2d_0$,

- у плоских при толщине более 3 мм

- от $l_0 + 0,5(F_0)^{1/2}$ до $l_0 + 1,5(F_0)^{1/2}$,

- у плоских при толщине менее 3 мм

- от $l_0 + 0,5b_0$ до $l_0 + 2b_0$;

Где F_0 - начальная площадь поперечного сечения в рабочей части.

Диаметр рабочей части цилиндрических образцов может отклоняться от заданного не более чем на $\pm 0,1$ мм при $d_0 < 10$ мм, на $\pm 0,2$ мм при $d_0 = 10 \dots 20$ мм и на $\pm 0,25$ мм при $d_0 > 20$ мм. Допускаемая ГОСТом разница наибольшего и наименьшего диаметра рабочей части одного образца составляет 0,03; 0,04 и 0,05 мм для $d_0 < 10$, $d_0 =$ от 10 до мм 20 и $d_0 > 20$ мм соответственно.

Испытательные машины

Основные узлы испытательной машины:

- приводное устройство;
- силоизмерительный механизм.

По принципу действия:

- с электромеханическим приводом (50000Н-100000Н);
- с гидравлическим приводом (более 10^6 Н).



Порядок проведения испытания

1. Составить протокол испытания.

№ п/п	Материал	Геометрические размеры образца						Результаты испытания												
		d_0	l_0	$l_{\text{раб}}$	d_k	l_k	F_0	F_k	$P_{0,2}$	P_T^B	P_T^H	P_B	P_K	$\sigma_{0,2}$	σ_T^B	σ_T^H	σ_B	S_K	δ	Ψ
		мм					мм ²		Н					Н/мм ²				%		
1																				
2																				
3																				

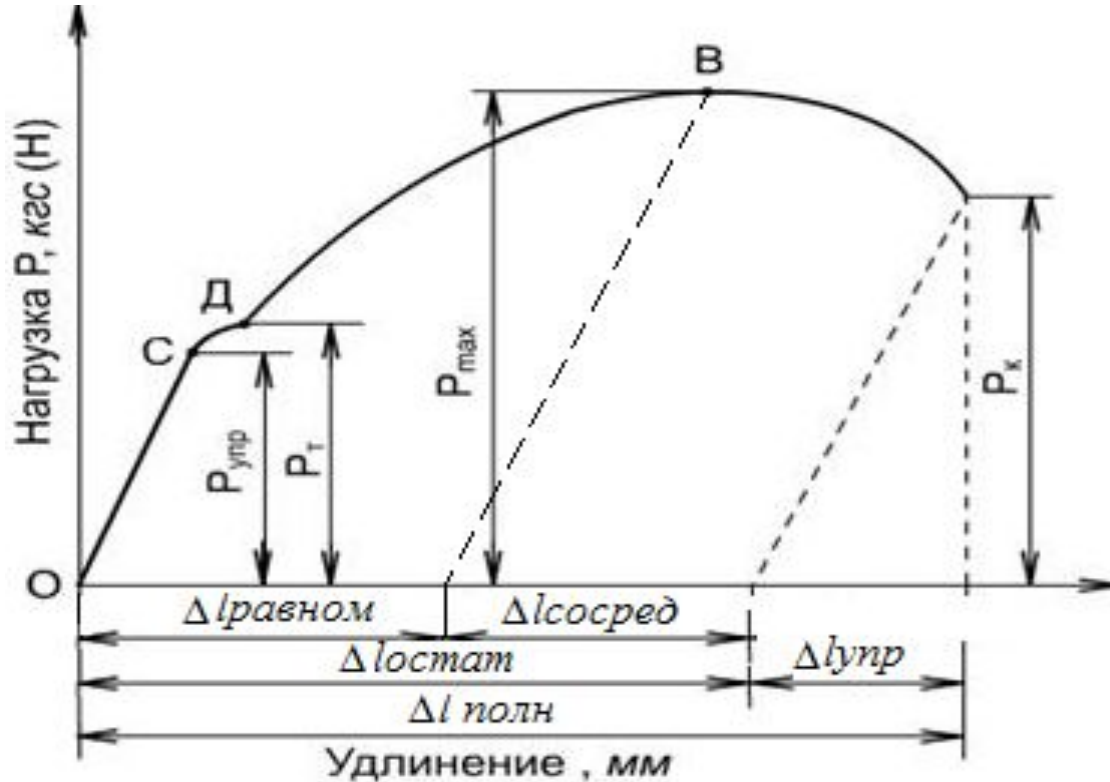
2. На рабочую поверхность образца наносят метки, обозначающие l_0 , микрометром или штангенциркулем с точностью не менее 0,01 мм измеряется диаметр рабочей части в трех местах (F_0 вычисляют по величине **наименьшего** диаметра).



3. Образец устанавливается в захваты. Устанавливается скорость перемещения захватов. Она должна быть не более $0,1 \cdot l_0$ мм/мин до достижения нагрузки равной $P_{0,2}$.



4. Обработка результатов испытания



$$\sigma_i = P_i / F_0 \text{ [Н/мм}^2\text{]}$$

где σ_i – определяемая прочностная характеристика (Н/мм²); P_i – соответствующее напряжению усилие, определяемое по диаграмме растяжения (Н); F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца (мм²).

Прочностные характеристики в истинных напряжениях рассчитываются как:

$$S_i = P_i / F_i \text{ [Н/мм}^2\text{]},$$

где S_i – определяемая прочностная характеристика (Н/мм²); P_i – соответствующее напряжению усилие, определяемое по диаграмме растяжения (Н); F_i – фактическая площадь поперечного сечения образца (мм²).

Прочностные характеристики, определяемые по диаграмме деформации

$\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности – это максимальное напряжение при котором выполняется закон Гука;

σ_T ($\sigma_{0,2}$) – физический (условный) предел текучести. Условный пределом текучести – напряжение, при котором остаточная пластическая деформация составляет 0.2%. Физический предел текучести это напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки (на диаграмме наблюдается «площадка текучести»).

σ_B – предел прочности – это максимальное напряжение, выдерживаемое образцом до разрушения.

S_k – истинное напряжение разрушения – напряжение при котором происходит разрушение образца.

Определение условного предела текучести

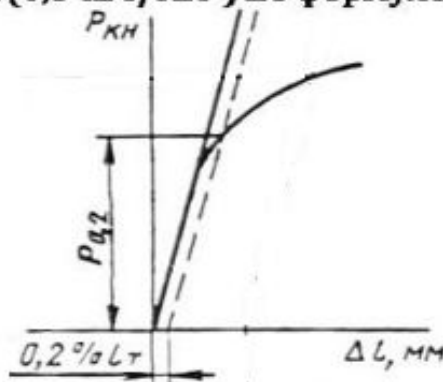
Предел текучести, МПа (кгс/мм²), вычисляют с погрешностью не более 5 МПа (0,5 кгс/мм²) по формуле

$$\sigma_{\tau} = \frac{P_{\tau}}{F_0}$$

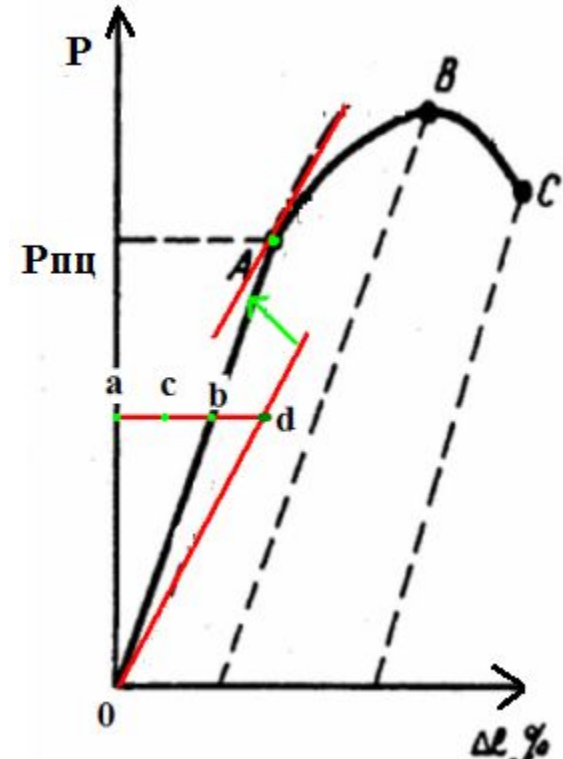
Условный предел текучести в МПа (кгс/мм²), вычисляют с погрешностью не более 5 МПа (0,5 кгс/мм²) по формуле

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$$

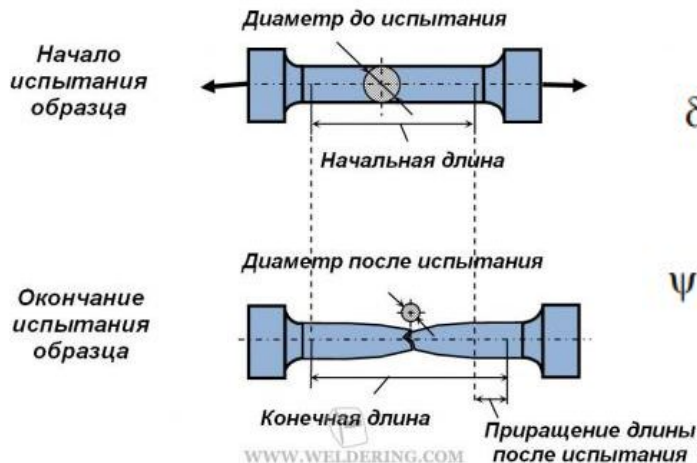
Предел текучести определяется по диаграмме растяжения в соответствии с ГОСТ 1497:



Определение предела пропорциональности



Определение характеристик пластичности

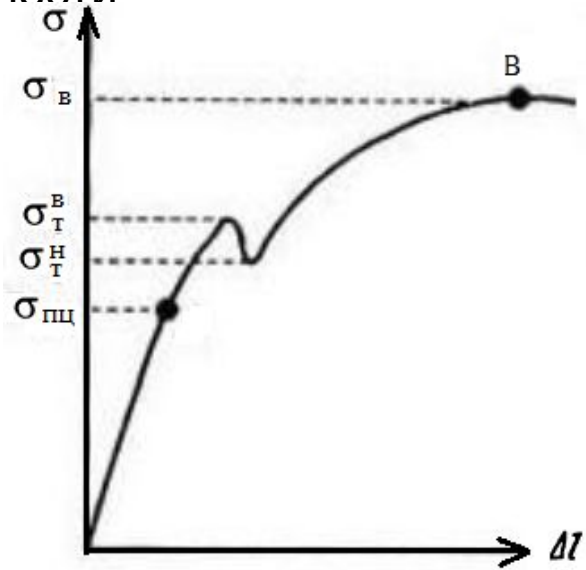


$$\delta = \frac{(l_k - l_0)}{l_k} \cdot 100\%$$

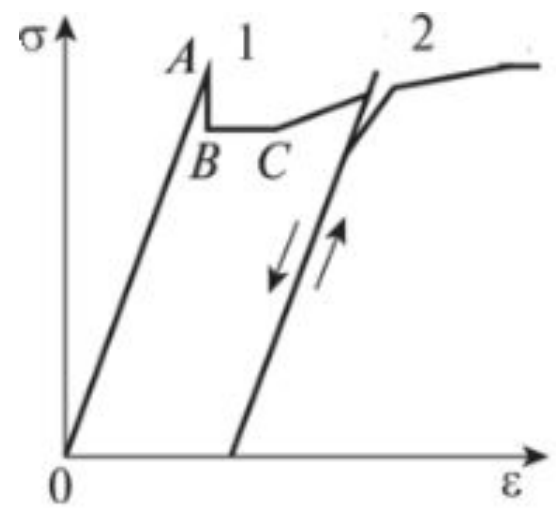
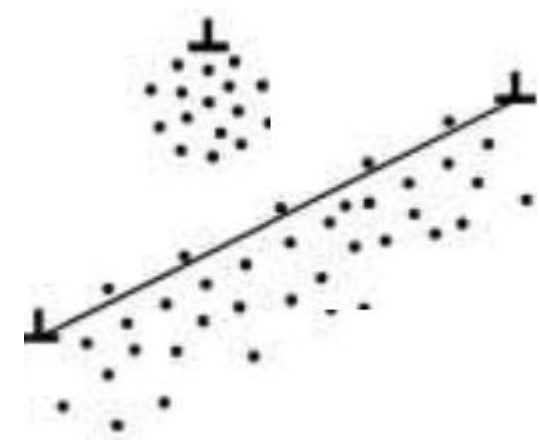
$$\psi = \frac{(F_0 - F_k)}{F_0} \cdot 100\%$$

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}, [\text{Н/мм}^2]$$

Диаграмма деформации с «зубом» текучести



Атмосферы Коттрелла



Устранение текучести предварительной пластической деформацией

Типы первичных диаграмм

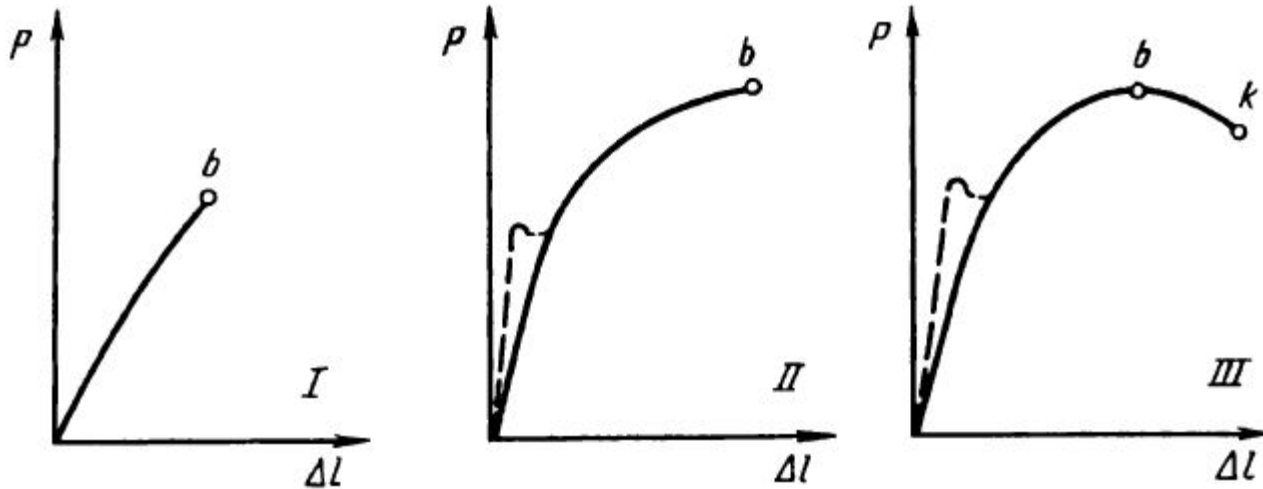


Диаграмма растяжения I типа характерна для образцов, разрушающихся без заметной пластической деформации.

Диаграмма II типа получается при растяжении образцов, равномерно деформирующихся вплоть до разрушения.

Диаграмма III типа характерна для образцов, разрушающихся после образования шейки в результате сосредоточенной деформации. Такая диаграмма может получиться и при растяжении образцов разрушающихся без образования шейки (при высокотемпературном растяжении).

Диаграмма в координатах «напряжение- абсолютное удлинение»

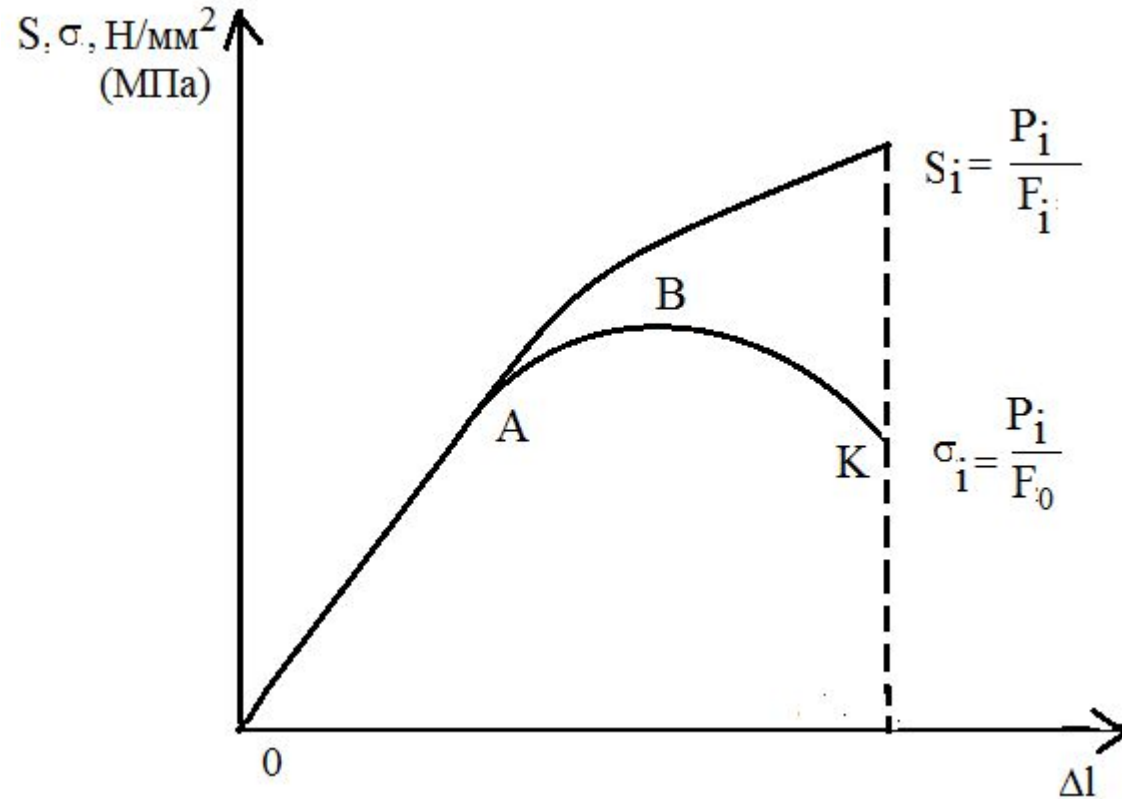
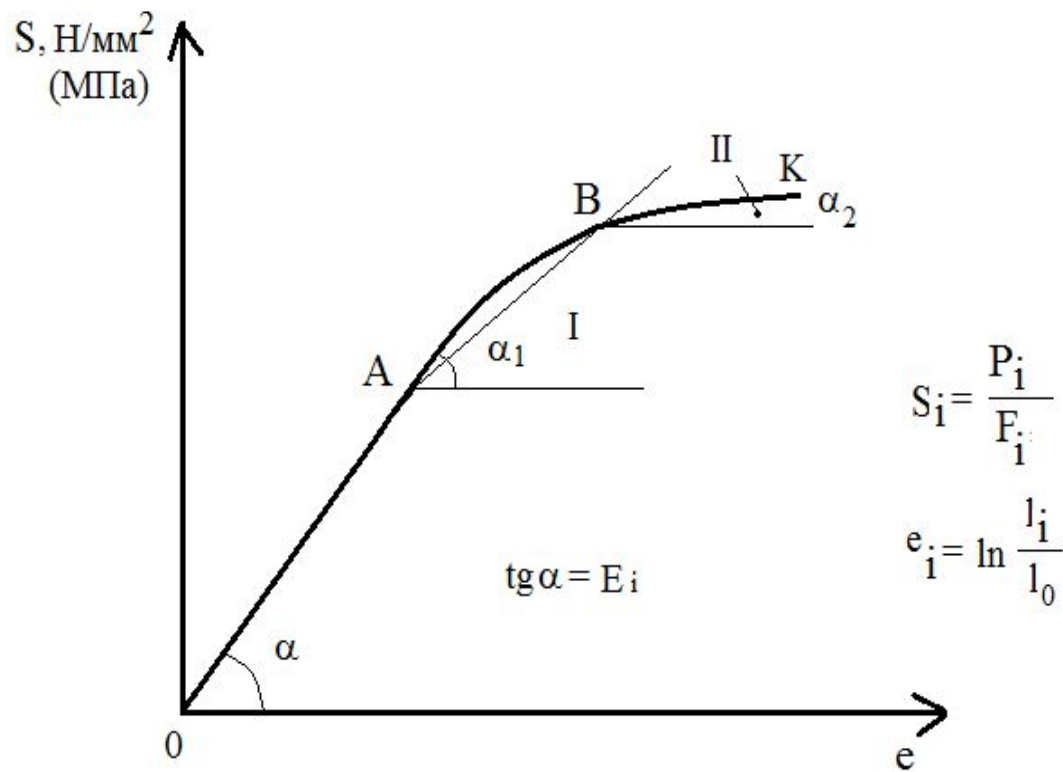


Диаграмма деформации в истинных координатах S-e

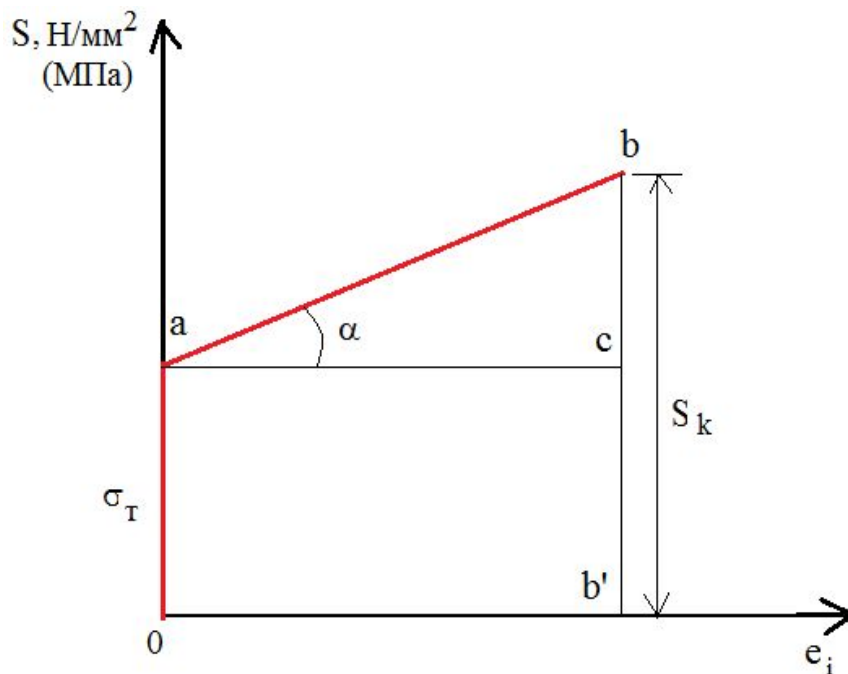


$$\text{tg } \alpha_1 = D_0$$

$$\text{tg } \alpha_2 = D_k$$

D_0 — начальный коэффициент упрочнения;
 D_k — конечный коэффициент упрочнения.

Упругая деформация у металлов невелика (0,1-1%). Если ею пренебречь и считать, что коэффициент упрочнения не меняется при холодной пластической деформации (т. е. $D_0 = D_k$), тогда диаграмма деформации «S-e» будет иметь следующий вид.



$$\frac{bc}{ac} = \operatorname{tg}\alpha = D$$

$$bc = Sk - \sigma_T$$

$$ac = e$$

$$\frac{Sk - \sigma_T}{e} = D$$

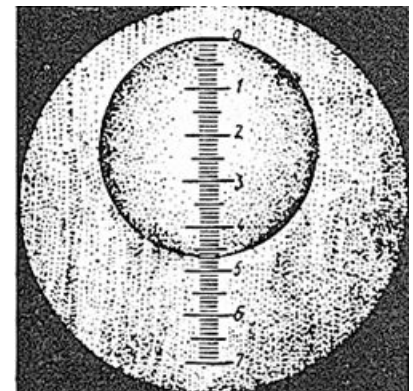
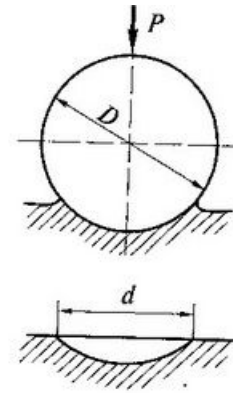
$$e = \frac{Sk - \sigma_T}{D}$$

Вязкость металла а - площадь трапеции $0abb' = \frac{0a + bb'}{2} \cdot 0b'$

$$a = \frac{\sigma_T + Sk}{2} \cdot \frac{Sk - \sigma_T}{D} = \frac{Sk^2 - \sigma_T^2}{2D}$$

Статические методы измерения твердости

Метод Бринелля (ГОСТ 9012-59)



Диаметр отпечатка получается тем меньше, чем выше сопротивление материала образца деформации, производимой индентором.

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

При определении твердости по Бринеллю шариком с $D=10$ мм под нагрузкой $P=30$ кН и времени выдержки $t=10$ с число твердости записывают так: 400 HB, 250 HB, или HB=3000 МПа ($\text{H}/\text{мм}^2$).

При использовании других условий испытания индекс HB рекомендуется дополнять цифрами, указывающими диаметр использованного шарика, мм; нагрузку, кгс; и продолжительность выдержки, с. Например, $350 \text{ HB}_{5/750/30}$ - это число твердости по Бринеллю (350), полученное при вдавливании шарика с $D = 5$ мм нагрузкой $P= 750$ кгс (7500 Н) в течение $T = 30$ с.

Твердость по Бринеллю определяют при помощи шарового **индентора диаметром 1; 2; 2,5; 5 или 10 мм.**

Инденторы чаще всего изготавливают из стали с твердостью не менее 8500 МПа (ШХ15) для испытания материалов с твердостью от 8 HB до 450 HB. При большей твердости образца стальной шарик-индентор остаточной деформируется на величину, превышающую стандартизованный допуск.

Поэтому для измерения твердости по Бринеллю материалов с > 450 HB используют шарики из твердого сплава (ВК6) с твердостью по Бринеллю - 15000 МПа. Число твердости по Бринеллю, определяемое с использованием таких инденторов, обозначают HBW.

1. Расстояние от края образца до центра отпечатка должно быть не менее $2,5d$; между центрами соседних отпечатков – не менее $4d$ (исключается деформированная зона).
2. Чем больше диаметр отпечатка, тем точность его измерения выше (тем и выше точность определения HB). Поэтому следует при измерении твердости применять наибольший шарик и нагрузку из числа допускаемых ГОСТ.
3. Отношение d/D должно быть 0.2-0.6.
4. Образец должен иметь гладкую поверхность. Опорные поверхности должны быть параллельны.
5. Числа твердости по Бринеллю зависят от нагрузки. Одинаковые результаты при измерении твердости на материале при разных D и P получаются, если выполняется соотношение

$$P = K \cdot D^2$$

K – постоянный коэффициент, принимаемый:

$K = 30$ для черных металлов;

$K = 10$ для цветных металлов;

$K=2,5$ для очень мягких (Pb, Al).

Достоинства метода Бринелля:

- простота;
- большая поверхность отпечатка , что позволяет достаточно надежно измерить твердость неоднородного металла;
- для многих металлов наблюдается линейная зависимость $\sigma_B = x \cdot HB$.

Недостатки:

- Пресс Бринелля громоздкий и тяжелый;
- метод субъективен;
- неуниверсальность.

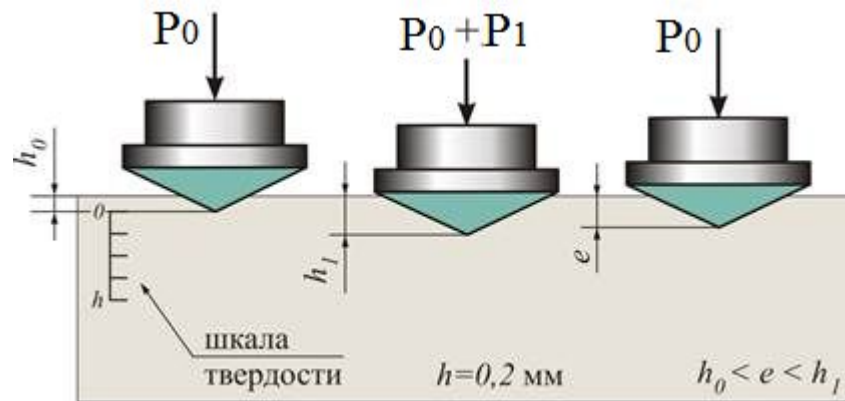
материал	x
Чугуны	0,15
Дюралю	0,38
Стали	0,33
Титановые сплавы	0,30

Метод Роквелла (ГОСТ 9013-59)

При измерении твердости по Роквеллу индентор — алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления $0,2$ мм, либо стальные шарики диаметром $1,5875$ мм ($1/16$ дюйма), либо $3,175$ мм ($1/8$ дюйма) - вдавливаются в образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок:

$$P = P_0 + P_1,$$

где P_1 - основная нагрузка, P_0 .



Число твердости по Роквеллу измеряют в условных единицах, оно является мерой глубины вдавливания индентора под определенной нагрузкой.

За 1 единицу твердости по Роквеллу принята величина, соответствующая перемещению индентора на $0,002$ мм. Шкала прессы Роквелла устроена так, что чем мягче металл, тем меньше и число твердости HR, хотя глубина вдавливания (h) увеличивается.

ГОСТ 9013-59 устанавливает 9 шкал твердости по Роквеллу.

При использовании в качестве индентора алмазного конуса твердость по Роквеллу определяют по трем «шкалам» - А, С и D.

Число твердости выражается формулой

$$HRC_{\alpha}(HRA, HRD) = 100 - e,$$

где $e = (h-h_0) / 0,002$.

При работе со стальными шариками твердость HR определяют по 6 шкалам (В, Е, F, G, Н, К) с использованием формулы:

$$HRB (HRE, HRF \text{ и т. д.}) = 130 - e.$$

Шкала твердости	Обозначение числа твердости	Индентор	P_0	P_1	P	Диапазон измерений единиц твердости
			$H \times 10$			
А	HRA	алмазный конус	10	50	60	20-88
С	HRC		10	140	150	20-77
D	HRD		10	90	100	40-77
В	HRB	1,588	10	90	100	20—100
Е	HRE	3,175	10	90	100	70—100
F	HRF	1,588	10	50	60	60—100
G	HRG	1,588	10	140	150	30—94
Н	HRH	3,175	10	50	60	80—100
К	HRK	3,175	10	140	150	40—10



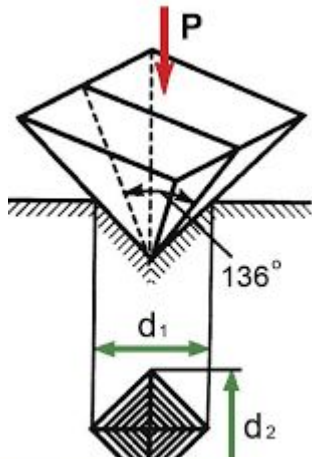
Недостатки метода Роквелла:

1. Числа твердости по Роквеллу условные единицы и по этой причине их нельзя сравнивать между собой. Т.е. требуется перевод по таблицам в твердости НВ или НV.
2. Для измерения твердости разных по свойствам металлов необходимо изменять условия испытания (индентор, нагрузку).

Достоинства метода Роквелла:

1. Замер твердости проводится быстро, результат испытания фиксируется на шкале прибора.
2. Можно измерять твердость цилиндрических образцов или деталей, применяя специальный столик.

Твердость по Виккерсу (ГОСТ 2999-75)



$P = 10-1000 \text{ Н}$ (1-100 кгс), время приложения нагрузки (10-15 с).
Измеряют диагональ отпечатка d , оставшегося на поверхности образца.

Число твердости HV

$$HV = 1,854P/d^2.$$

Если число твердости выражают в МПа, то после него указывают единицу измерения (например, $HV=3200 \text{ МПа}$ или Н/мм^2).



Физический смысл числа твердости по Виккерсу аналогичен HB, величина HV тоже является усредненным условным напряжением в зоне контакта индентор-образец и характеризует обычно сопротивление материала значительной пластической деформации.



Преимущества метода Виккерса:

1. Отпечатки получаются геометрически подобными при любой нагрузке и поэтому числа твердости от нагрузки не зависят.
2. Можно использовать для замера микротвердости.

Недостатки:

1. Высокие требования к качеству поверхности.
2. При грубой структуре может быть большой разброс значений.

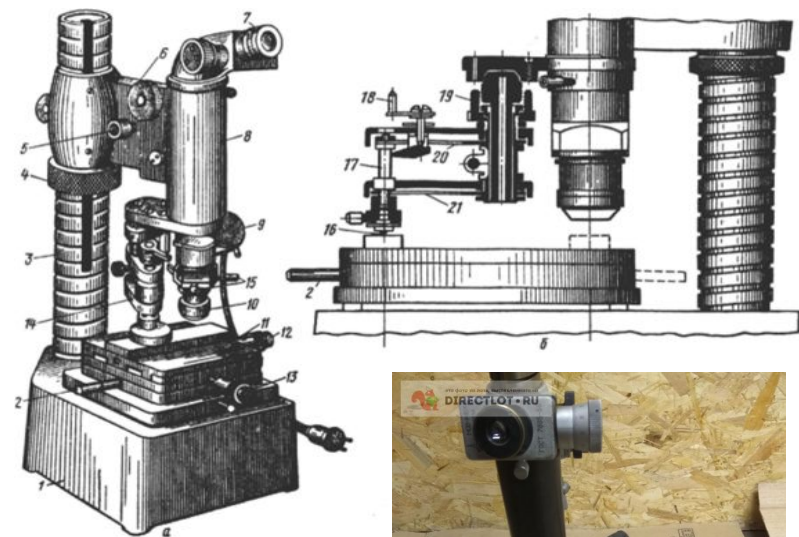
Определение микротвердости ГОСТ 9450-76

Метод определения микротвердости предназначен для оценки твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов.

Его применяют для измерения твердости мелких деталей, тонкой проволоки или ленты, тонких поверхностных слоев, покрытий и т.д. Важное назначение - оценка твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, а также разницы в твердости отдельных участков этих составляющих,

Индентор алмазная пирамидка с углом при вершине 136° , нагрузка от 5 до 500 г (от 0,05 до 5Н).

Числа твердости записываются $120\text{HV}_{0,01}$ где 120 кг/мм^2 число твердости, а $P=0,01\text{Н}$ (100 г).



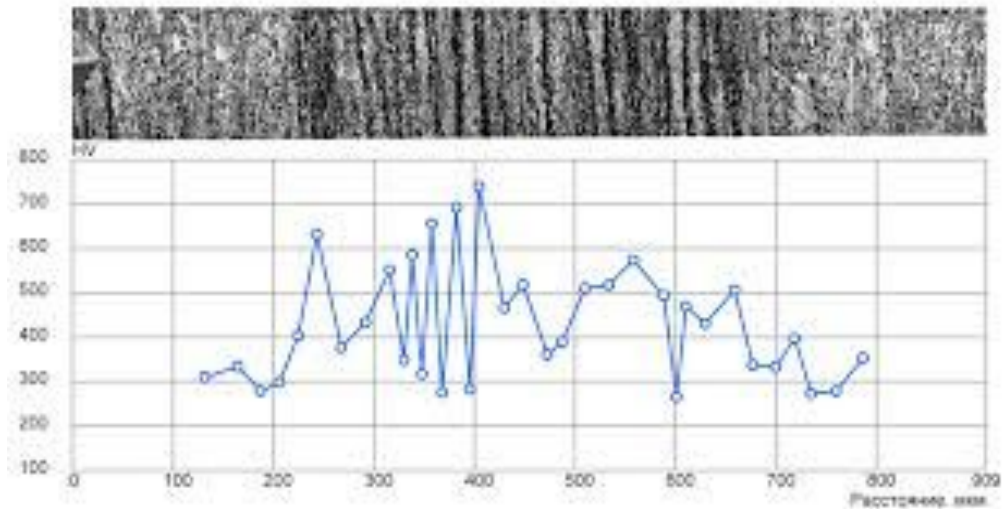
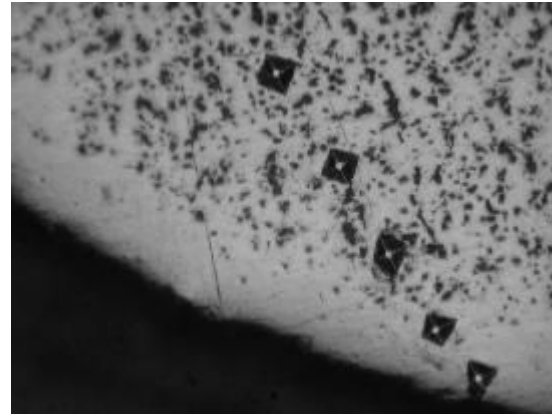
tvoi-uvellir.ru



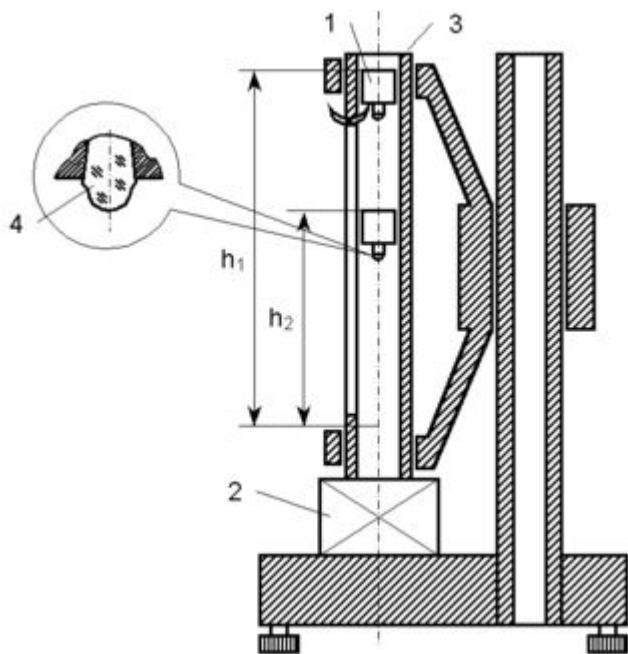
Прибор для измерения твёрдости по Виккерсу



Примеры измерения микротвердости



Динамические методы определения твердости



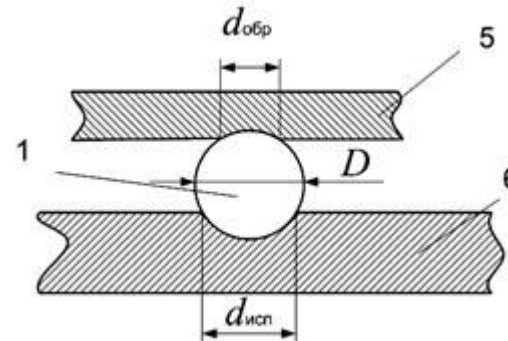
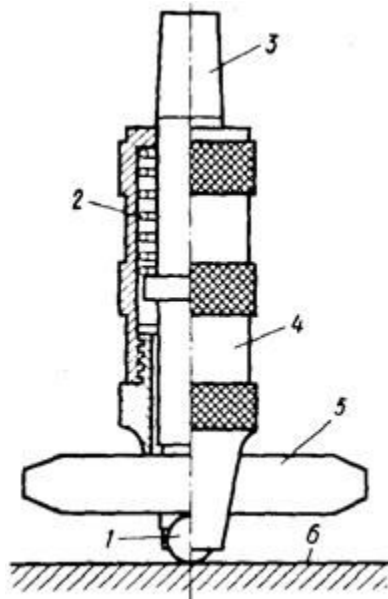
1 — боёк, 2 — испытуемый образец, 3 — трубка склерометра, установленная на штатив, 4 — алмаз.

Числа твердости по Шору (HSD) определяются высотой упругого отскока бойка, который падает на поверхность образца с фиксированной высоты. Боек (36 г) с алмазным сердечником. Энергия бойка расходуется на упругую и пластическую деформацию в месте удара и на последующее поднятие бойка. 100HSD принято для закаленной на мартенсит стали У8. Метод широко используется для замера твердости горячего металла малогабаритным прибором.

Метод Польди (ГОСТ 18661-73)

Измерение твердости методом ударного отпечатка. Применяется для массивных деталей и конструкций, когда другие способы неприменимы.

Для измерения твердости служит прибор, состоящий из корпуса 4, бойка 3, шарика 1, пружины 2. В прибор закладывают эталон 5 (стальной брусок, твердость которого известна), а прибор устанавливают на поверхность исследуемой детали 6. При ударе молотка по верхней части бойка 3 шарик диаметром 10 мм вдавливается одновременно в испытуемую деталь и эталон, образуя при вдавливании лунки

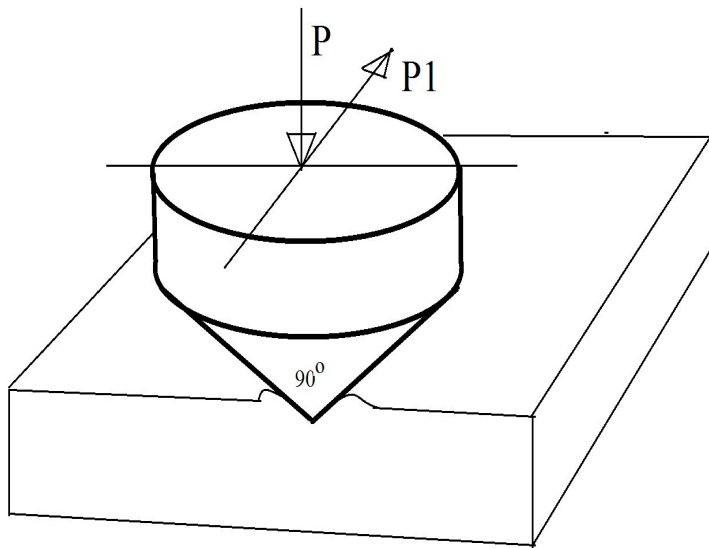


$$HP = H_3 \frac{F_3}{F_k} = H_3 \frac{(D - \sqrt{D^2 - d_3^2})}{(D - \sqrt{D^2 - d_k^2})}$$

Метод царапания

Состоит в проведении царапины на поверхности испытуемого металла алмазным или другим недеформирующимся остриём, нагруженным постоянной нагрузкой. За меру твёрдости принимается или ширина царапины при постоянной нагрузке, или величина нагрузки, при которой получается определённая ширина царапины.

Для испытания твёрдости по методу царапания образцы должны быть тщательно отполированы, а ширина царапины должна измеряться с точностью до долей микрона.



Индентор алмазный конус с углом при вершине 90° .

Кроме нормально приложенной нагрузки «P» к конусу прилагается нагрузка «P1», обеспечивающая перемещение индентора.

Числа твердости в этом методе Нц определяются величиной ширины царапины (b), полученной при нагрузке $P=50$ г:

$$Нц=1/b_{P0,5}$$

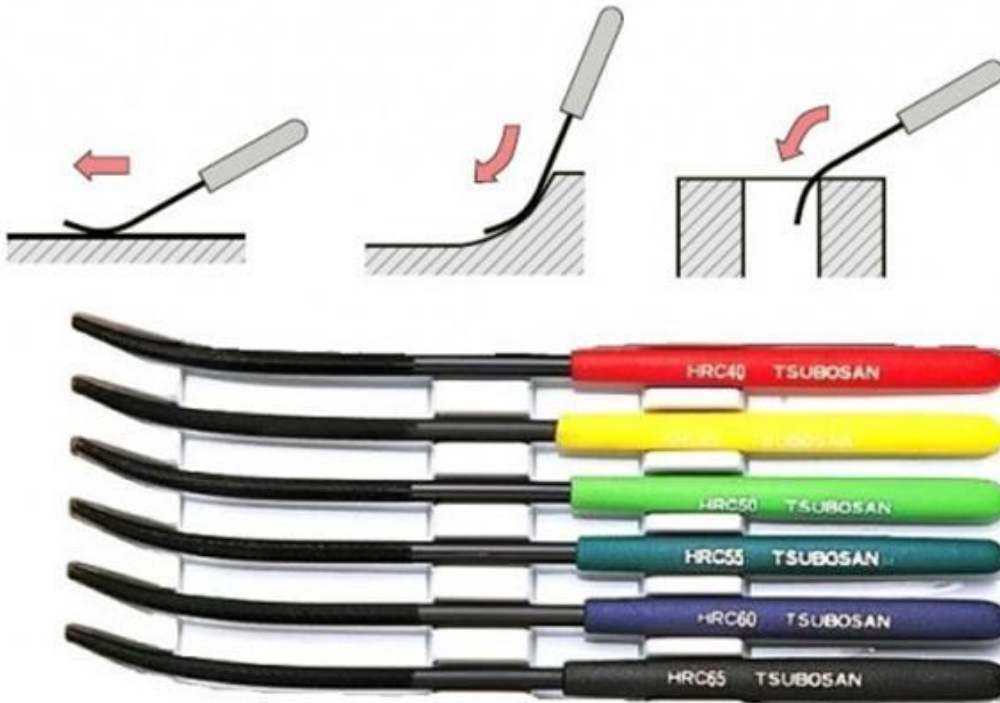
В процессе испытания металл сначала пластически деформируется, а затем, когда напряжения достигнут величины, соответствующей сопротивлению разрушению (путем среза) происходит разрыв (образуется царапина).

Известна зависимость между сопротивлением разрушению и числом твердости царапанием:

$$Sk=40(1/b_{0,5} - 22,5), \text{ МПа.}$$

Величина Нц характеризует также износостойкость металла, его обрабатываемость резанием.

Сравнительный метод определения твердости



Тарированные напильники

			ITEM No.
175L	65 ϕ	ϕ 4.3	MA 00600

色 COLOR	表示 INDICATION	テスターの実硬表 FILE-HARDNESS	
赤 RED	HRC 40	HRC 40~42	HV 392~412
黄 YELLOW	HRC 45	HRC 45~47	HV 446~471
黄緑 LIGHT-GREEN	HRC 50	HRC 50~52	HV 513~544
緑 GREEN	HRC 55	HRC 55~57	HV 595~633
青 BLUE	HRC 60	HRC 60~62	HV 697~746
黒 BLACK	HRC 65	HRC 65~67	HV 800~865



Набор колец из стали ШХ15

Испытание на ударный изгиб

ГОСТ 9454-78 – при комнатной температуре;

ГОСТ 9455-78 – при отрицательных температурах;

ГОСТ 9456-78 – при повышенных температурах.

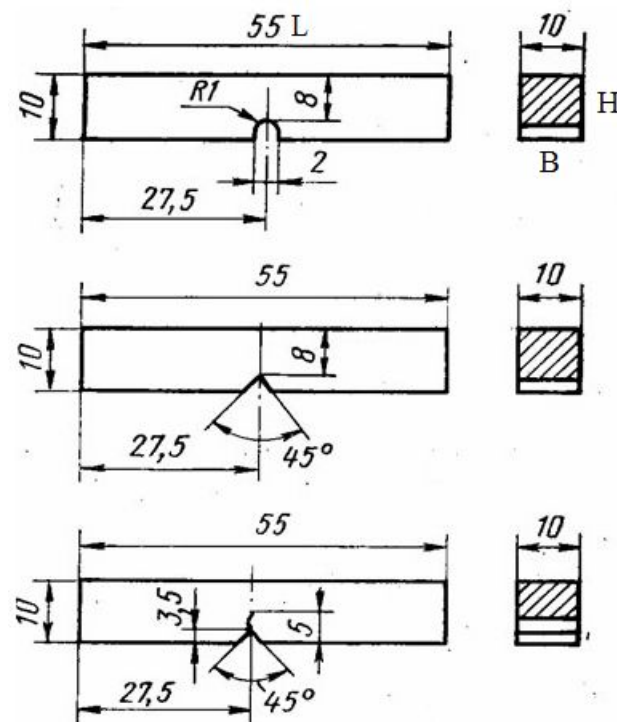
При динамических испытаниях закон подобия не действует. Поэтому здесь необходима жесткая унификация размеров образцов и условий проведения испытания.

Основным образцом по ГОСТ 9454-78 служит стержень с квадратным сечением 10x10 мм, длиной 55 мм и надрезом одного из трех видов.

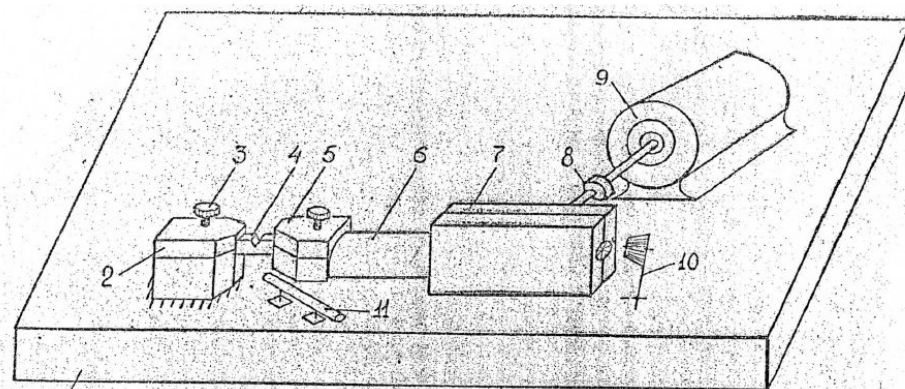
U образный надрез наносится посередине длины. Он имеет ширину и глубину 2 и радиус закругления 1 мм. Допускается использование образцов и шириной $B=7,5$; 5 и 2 мм. В последнем случае высота $H=8$ мм.

Образцы с V-образным концентратором имеют те же габариты и отличаются только геометрией надреза.

T –образный концентратор (надрез с усталостной трещиной). Длина L этих образцов тоже 55 мм, а высота сечения $H=11$ мм при $B=10$; 7,5 или 5 мм. Допускается применение образцов с $B=2$ мм и $H=9$ мм, $B=H=10$ мм и $B=H=25$ мм. В последнем случае $L=140$ мм.

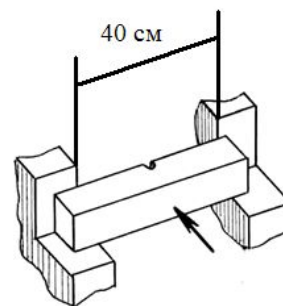
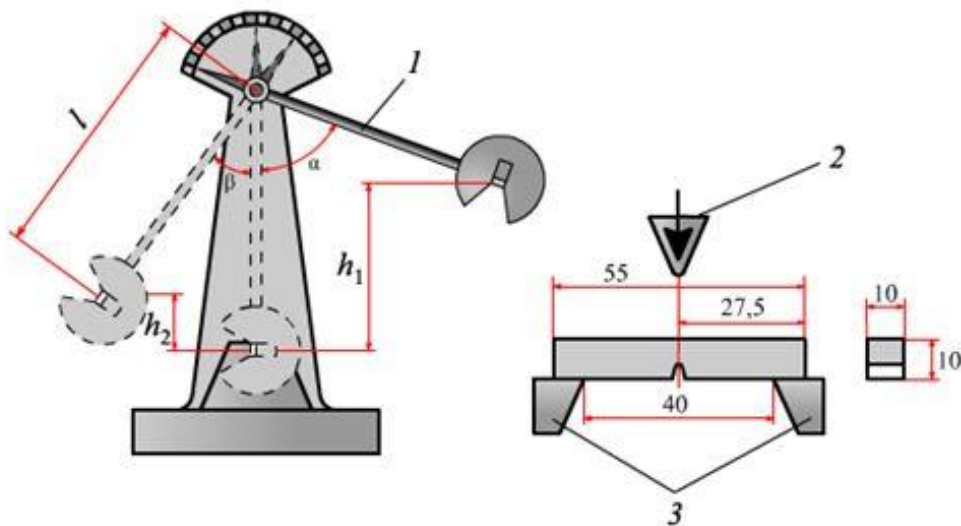


Нанесение концентраторов напряжений на ударные образцы



Эскиз резонансного вибратора В.А. Дроздовского:
1 - стальная плита; 2 - неподвижный захват; 3 - болт;
4 - образец; 5 - подвижный захват; 6 - труба;
7 - вибратор; 8 - эластичная муфта; 9 - электродвигатель; 10 - тормоз; 11 - рычаг.

Испытания на изгиб проводят на маятниковых копрах с предельной энергией, не превышающей 300 Дж*. Копры должны соответствовать требованиям ГОСТ 10708-82.



Расчет ударной вязкости

Величина работы деформации и разрушения определяется разностью потенциальных энергий маятника в начальный (после подъема на угол α) и конечный (после взлета на угол β) моменты испытания:

$$K = P(h_1 - h_2),$$

где P - вес маятника; h_1 и h_2 - высоты подъема и взлета маятника.

Если длина маятника L , то $h_2 = L(1 - \cos\beta)$, $h_1 = L(1 - \cos\alpha)$ и, следовательно:

$$K = PL(\cos\beta - \cos\alpha).$$

Шкала копра может быть проградуирована в единицах работы, если угол подъема маятника α фиксирован.

Зная полную работу деформации и разрушения, **K** , можно рассчитать основную характеристику, получаемую в результате рассматриваемых испытаний – **ударную вязкость**:

$$KC = K/F,$$

где F - площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания.

Часть энергии удара затрачивается на сотрясение копра и фундамента, преодоление сопротивления воздуха, на трение в подшипниках и в измерительном устройстве, на смятие образца на опорах и под ножом, на сообщение энергии обломкам образца и на упругую деформацию штанги маятника.

На копрах, применяемых при обычных испытаниях металлов, большинство этих потерь не поддается учету, в результате получаемые значения K оказываются завышенными на несколько процентов. Особенно велики потери энергии при несовпадении оси удара и середины надреза на образце. Поэтому величины ударной вязкости, определенные на различных копрах, могут отличаться друг от друга на 10-30%.

Точность определения работы излома тем выше, чем меньше превышение запаса работы маятника над работой деформации и разрушения образца; нужно стремиться, чтобы угол β после разрушения образца был небольшим.

Обозначение ударной вязкости

Если испытание проводилось при комнатной температуре на маятниковом копре МК-30 (300 Дж) на образце сечением 10x10мм и надрезом глубиной 2 мм, то:

$$KCU=50 \text{ Дж/см}^2 \text{ (5 кг}\cdot\text{м/см}^2\text{)},$$

$$KCV=40 \text{ Дж/см}^2 \text{ (4 кг}\cdot\text{м/см}^2\text{)},$$

Если испытание проводилось при комнатной температуре на МК-30, на образце других размеров, то:

$$KCU_{300/3/7,5}=10 \text{ Дж/см}^2 ,$$

(образец высотой 10 мм, шириной 7,5 и U-образный надрез глубиной 3 мм).

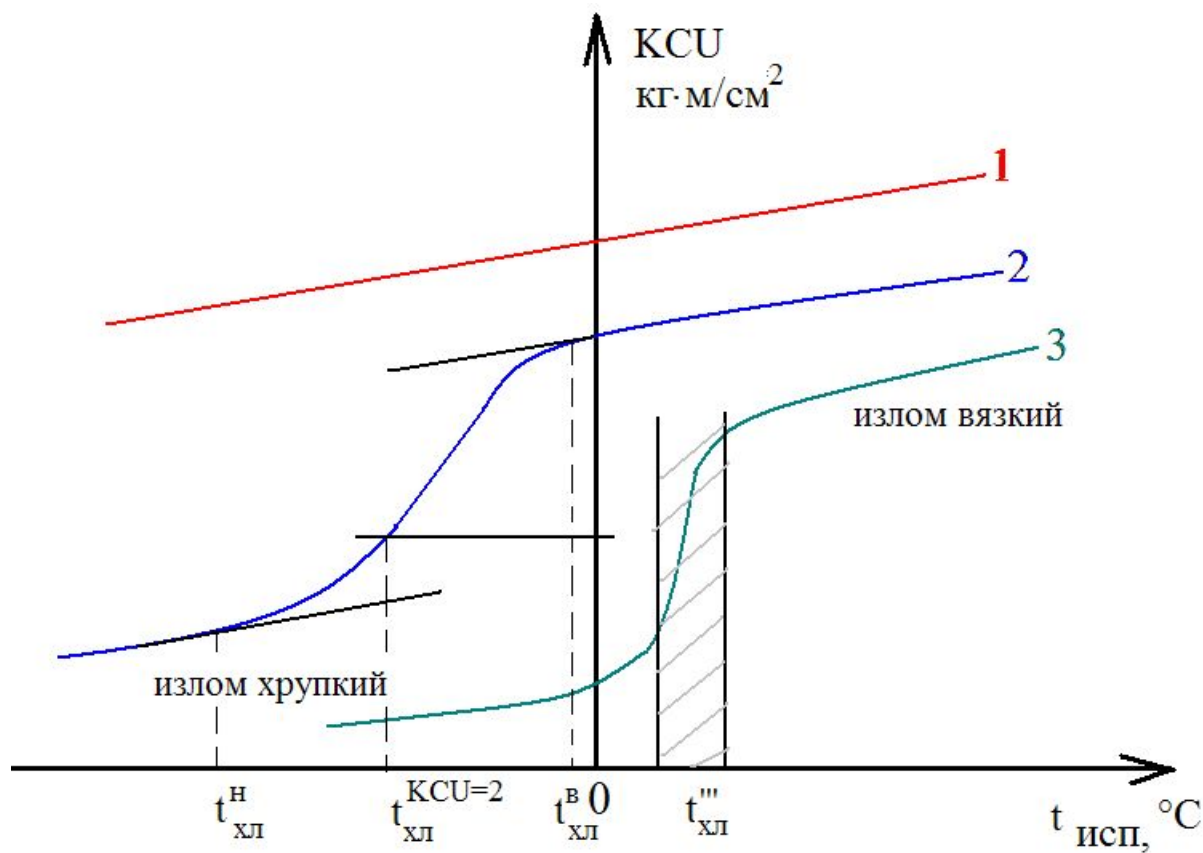
Если испытание проводят при температуре отличной от комнатной, то:

$$KCV^{-70}_{150/3/7,5}=20 \text{ Дж/см}^2$$

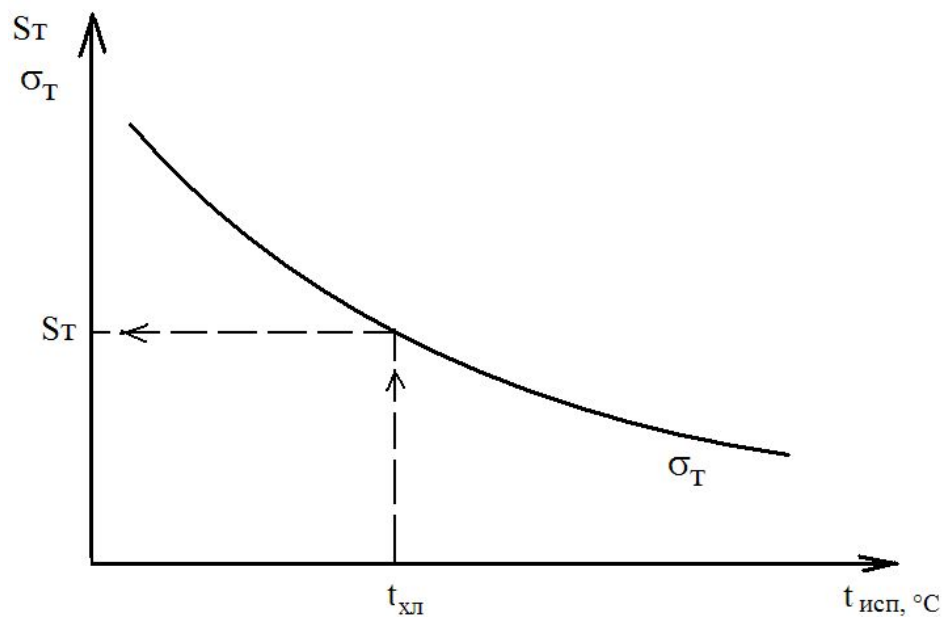
$$KCT^{-60}=18 \text{ Дж/см}^2$$

Испытания на ударную вязкость при различных температурах проводятся на нескольких образцах (серии образцах) и называют *серийными ударными испытаниями*. При этом строят графики зависимости $KCU=f(t^{\circ}C)$, $KCV=f(t^{\circ}C)$.

Обсуждение результатов серийных ударных испытаний



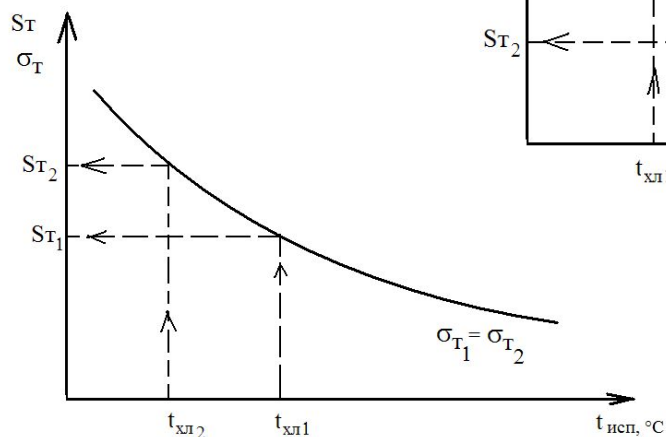
Косвенный способ оценки S_T по результатам серийных ударных испытаний и испытаний на статическое растяжение при различных температурах



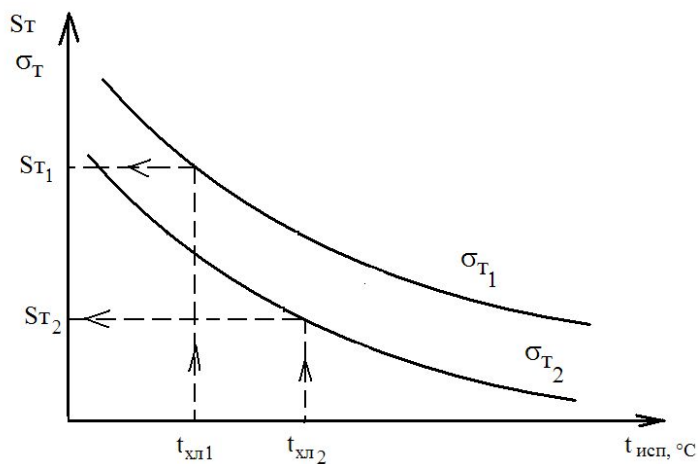
Обсуждение результатов серийных ударных испытаний и испытаний на статическое растяжение при различных температурах

Такие испытания проводятся для двух разных сталей. Задача – определить какая более склонна к хрупкому разрушению.

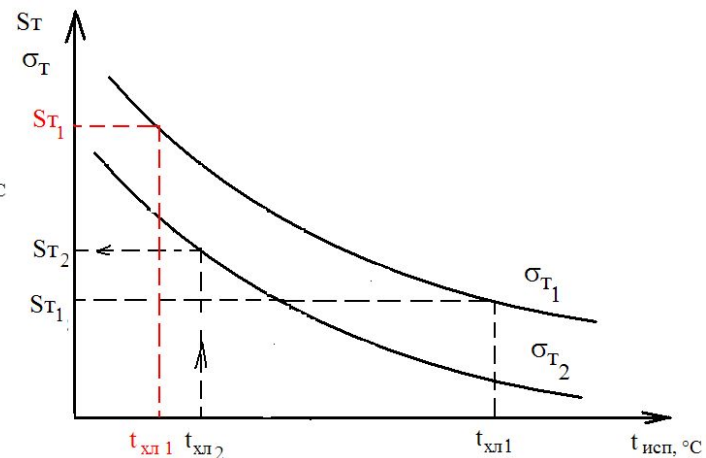
I случай. Пределы текучести примерно равны ($\sigma_{T1} \approx \sigma_{T2}$) и одинакова температурная зависимость $\sigma_T = f(t_{исп})$, а $t_{хл1} > t_{хл2}$.



II случай. Пределы текучести $\sigma_{T1} > \sigma_{T2}$, а $t_{хл1} < t_{хл2}$.



III случай. Пределы текучести $\sigma_{T1} > \sigma_{T2}$, а $t_{хл1} > t_{хл2}$.



Способы разложения ударной вязкости на составляющие

$$a_n = a_z + a_p$$

a_z - работа, затраченная на зарождение трещины;

a_p - работа, затраченная на распространение трещины.

1. *Метод Отани.*

Заключается в двукратном ударном нагружении надрезанного образца на маятниковом копре.

При первом нагружении уменьшают запас энергии маятника (поднимают его на меньшую высоту) так, чтобы в образце, в месте надреза возникла трещина.

С помощью краски фиксируют глубину трещины (определяют «живое сечение»).

При вторичном нагружении образец доламывают, фиксируют работу, затраченную на разрушение образца (A_p), и определяют работу распространения трещины:

$$a_p = A_p / F, \text{ кГ} \cdot \text{м} / \text{см}^2$$

Достоинства: Метод простой и не требует дополнительного оборудования.

Недостатки: Практически не применим для хрупких материалов, т. к. сложно подобрать условия нанесения первого удара для наведения трещины.

2. Метод Б.А. Дроздовского.

По сути - это метод КСТ.

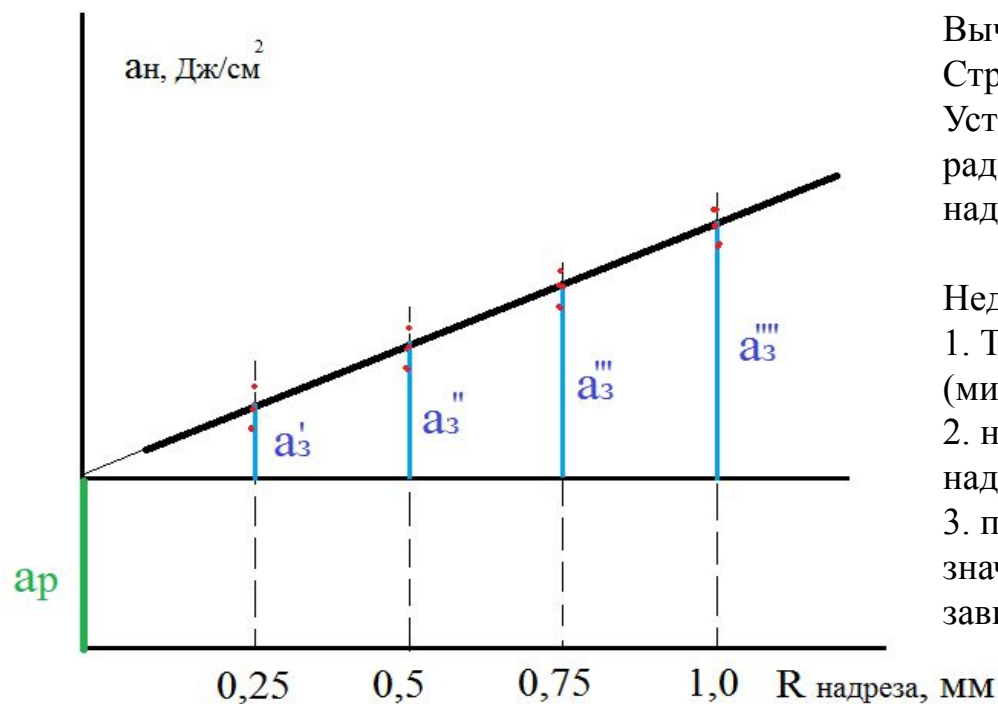
Недостатки метода:

- трудно получить трещину усталости размером 1 мм по всему сечению образца.
- не удастся зафиксировать постоянство живого сечения у разных образцов.
- определяется КСТ на материале, отличающемся от его исходного состояния.

3. Метод А.П. Гуляева.

Испытание проводят на маятниковом копре на образцах с различным радиусом надреза при обеспечении постоянства «живого сечения» на разных образцах.

Радиусы надреза 0,25 мм, 0,5 мм, 0,75 мм, 1 мм.



Вычисляют a_n (КСУ).

Строят график $a_n=f(R_{\text{надреза}})$.

Устанавливают линейную зависимость a_n от радиуса надреза и, экстраполируя ее на $R_{\text{надр}}=0$, на оси ординат определяют a_p .

Недостатки метода:

1. Требуется большое количество образцов (мин. 12 шт).
2. необходимо строго выдерживать радиус надреза при изготовлении образцов.
3. при большом разбросе экспериментальных значений трудно установить линейную зависимость.