

Механические, конструкционные и эксплуатационные свойства материалов и методы их определения

Общие понятия о нагрузках, напряжениях, деформациях и разрушениях материалов

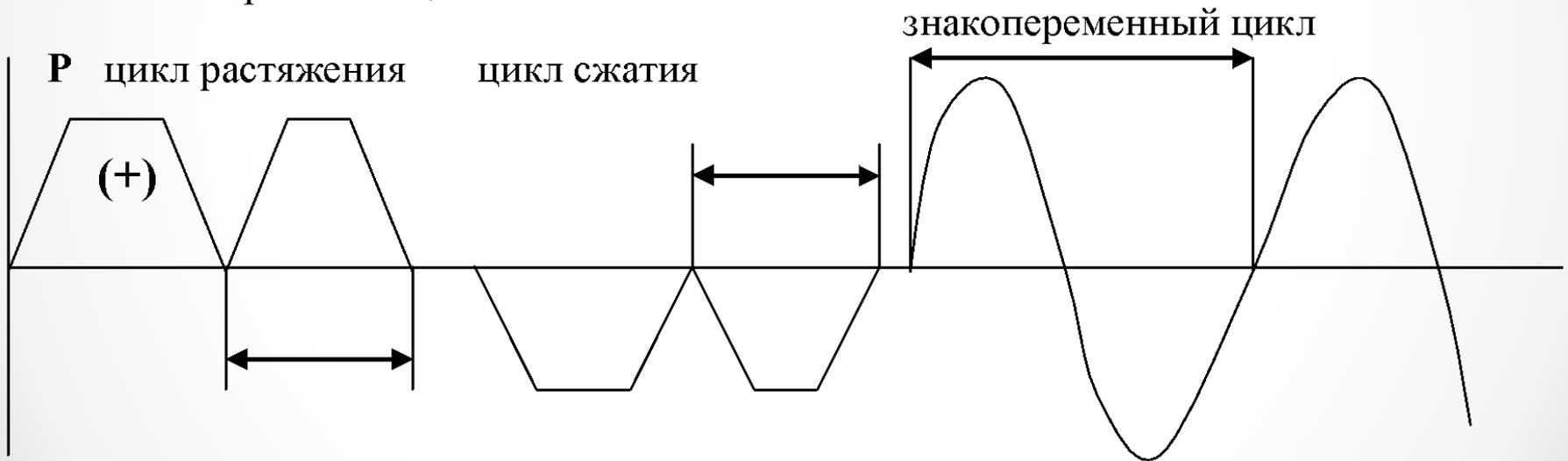
Деформацией называется изменение формы и размеров тела под действием напряжений

Нагрузки

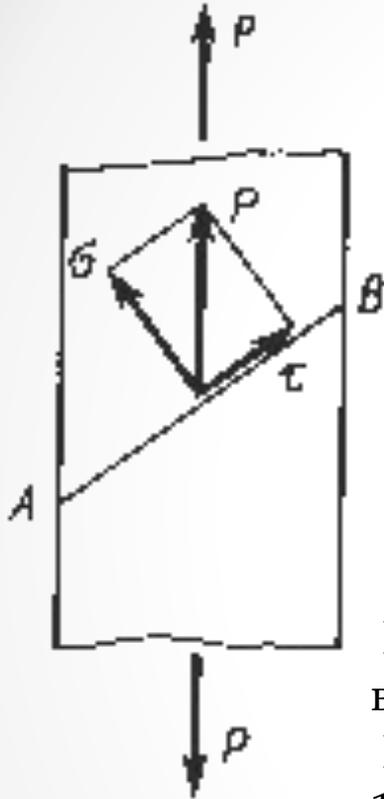
1. **статические** – скорость нагружения минимальная
2. **динамические** – высокая скорость нагружения – удар

Типы нагрузок

- растягивающие
- сжимающие
- изгибающие
- скручивающие
- срезающие



Напряжения



Напряжения - внутренние силы, приходящиеся на единицу площади поперечного сечения

Осевое растяжение цилиндра и внутренние силы

P - растягивающая сила

F_0 - площадь поперечного сечения :

$$\sigma = P/F_0.$$

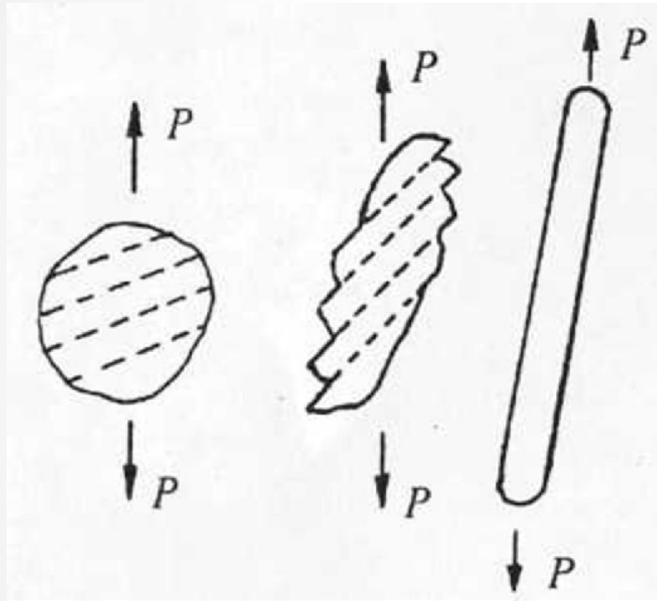
После снятия внешней нагрузки в теле могут оставаться внутренние напряжения.

Причины внутренних напряжений:

1. внешние механические нагрузки
2. резкие перепады температуры
3. структурно – фазовые превращения, происходящие в процессе технологической обработки материала.

Дислокационные механизмы

упругопластической деформации



Под действием силы P зерна расслаиваются на *пачки скольжения*, которые смещаются относительно друг друга, что приводит к вытягиванию зерен в волокна.

При этом происходит разрастание дефектов, которые, даже разрывая только одну межатомную связь, приводят к смещению остальных, увеличивая пластическую деформацию.

Разрушение тела состоит из нескольких стадий

1. зарождение микротрещин
2. образование макротрещин
3. распространение макротрещин по всему объему.

Виды деформации

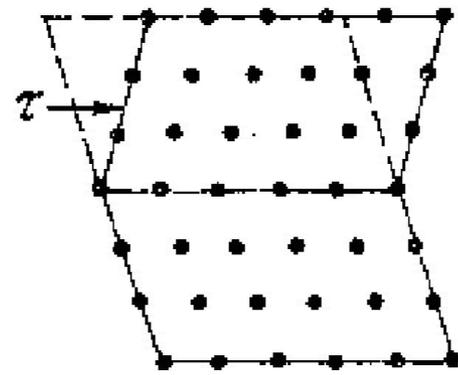
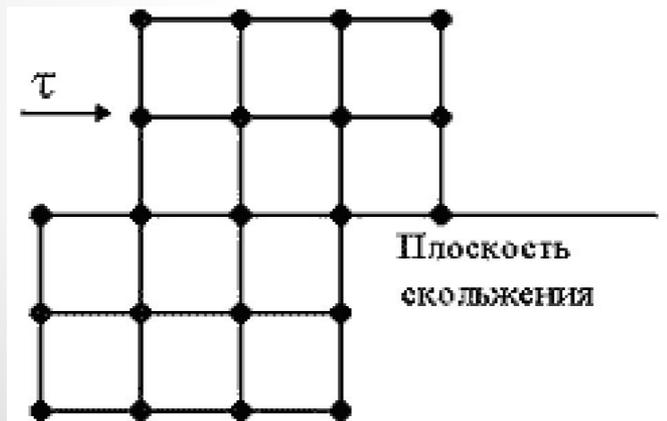
Деформация: линейная или угловая (деформация сдвига).

упругая – исчезающая после снятия нагрузки;

пластическая - остающаяся в теле (с изменением размеров).

При пластической деформации необратимо изменяется форма и размеры детали.

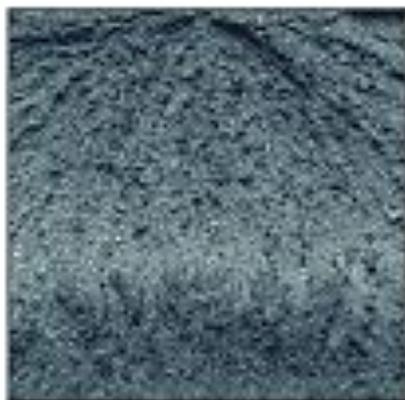
При пластической деформации изменение размеров тела может происходить скольжением (сдвигом) и двойникованием, т.е. поворотом одной части кристалла в положение, симметричное другой его части



Вязкое и хрупкое разрушение

- В результате пластической деформации может происходить вязкое и хрупкое разрушение.
- **Вязкое** – при действии касательных напряжений, сопровождается значительной пластической деформацией и происходит срезом. В месте разрушения наблюдается матовый излом.
- **Хрупкое** – под действием нормальных напряжений вызывающих отрыв частей без макропластической деформации – блестящий излом.

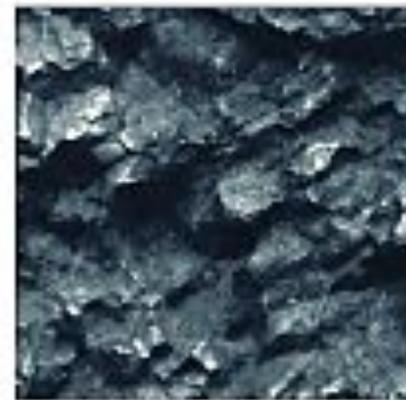
Исследование изломов металлов



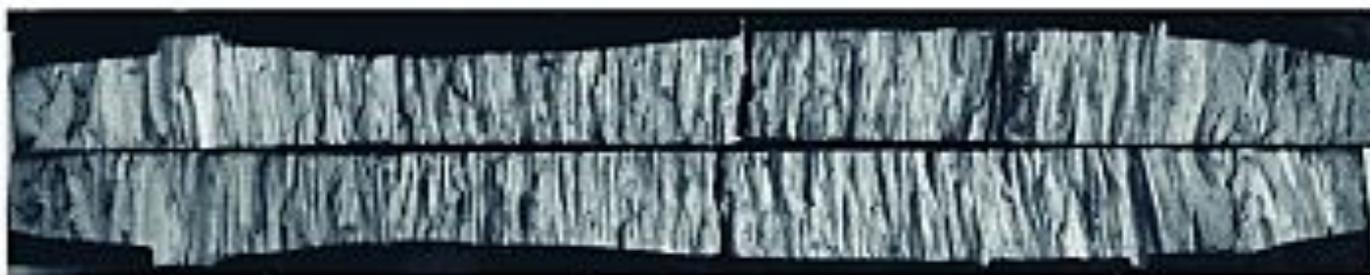
Вязкий излом X5



Некристаллитный хрупкий излом X5



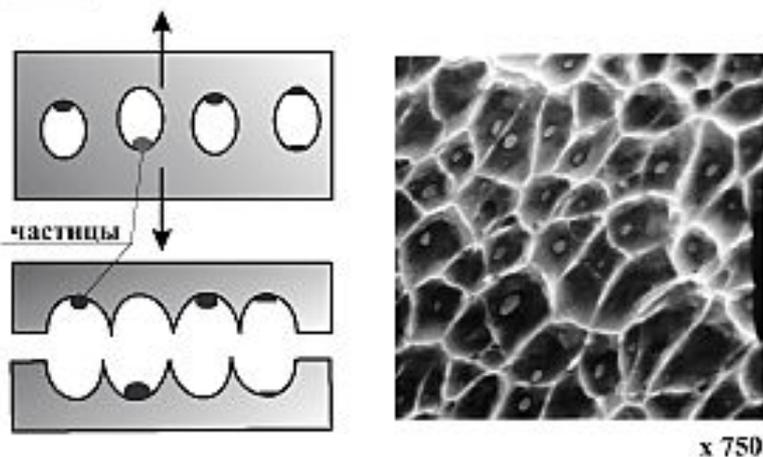
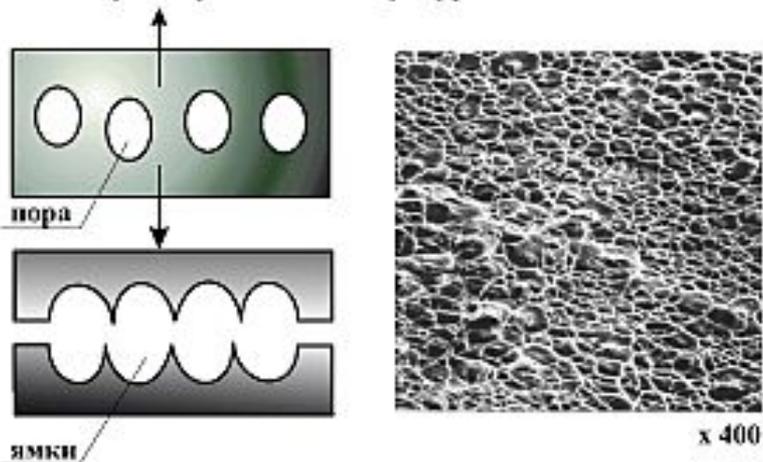
Кристаллитный хрупкий излом X5



Слоистый излом

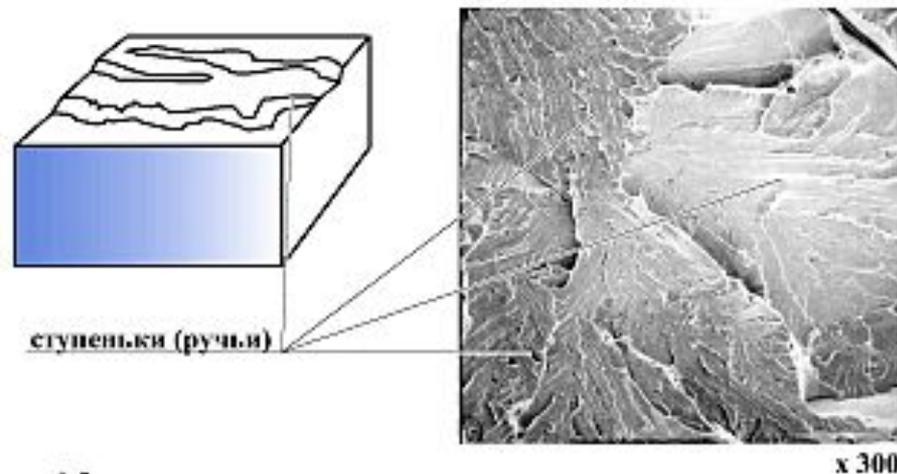
Исследование изломов на сканирующем электронном микроскопе

Вязкое транскристаллитное разрушение

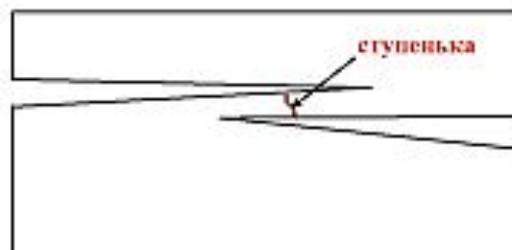


Исследование изломов на сканирующем электронном микроскопе

Хрупкое транскристаллитное разрушение (скол)



Образование ступенек

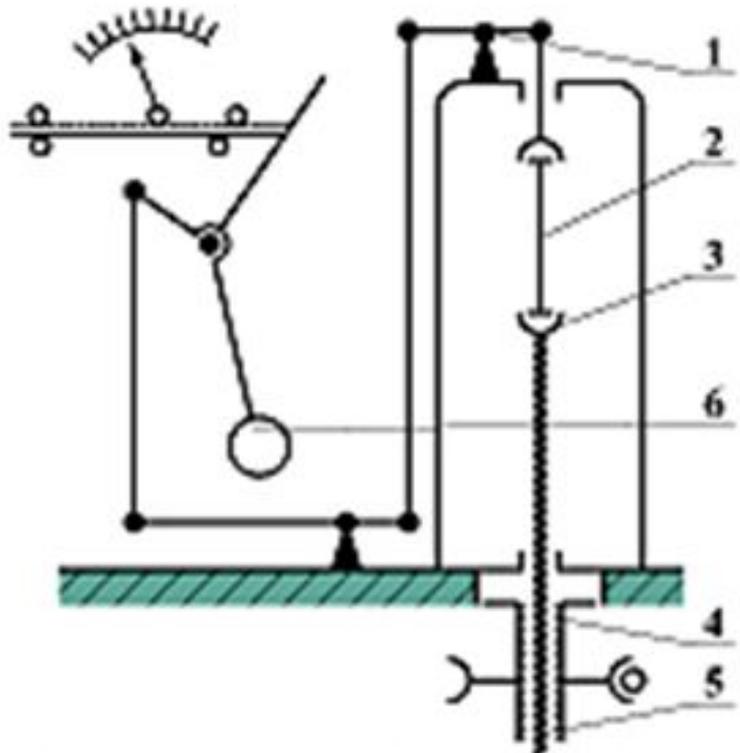


Свойства и методы испытания материалов

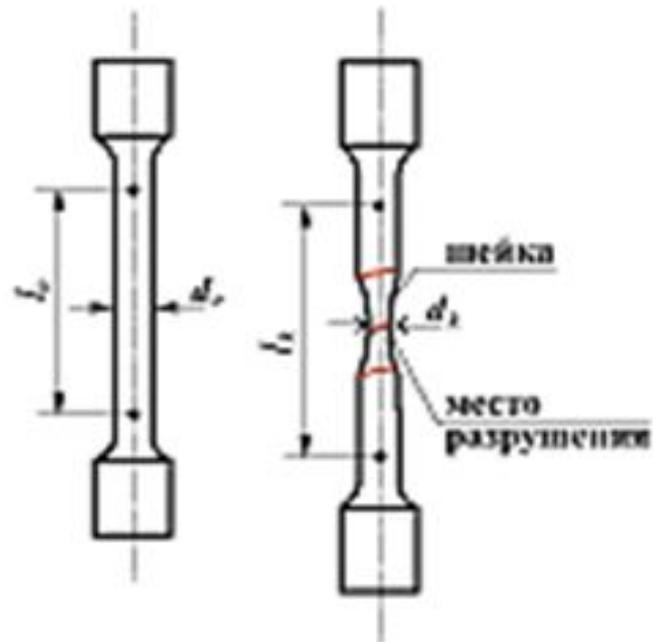
Определяют:

- упругость
- пластичность
- твердость
- вязкость
- усталость
- трещиностойкость
- холодостойкость
- жаропрочность

Статическое испытание на растяжение



1 – силовой измеритель; 2 – образец; 3 – захваты;
4 – грузовой винт; 5 – гайка; 6 – маятник



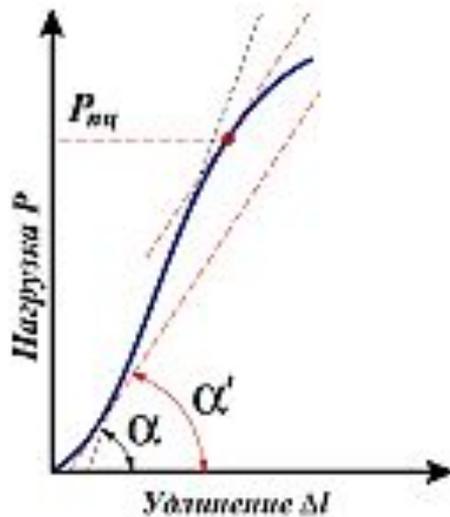
Разрывной образец
до и после испытаний

Диаграмма растяжения



Испытания на растяжение

Характеристики прочности

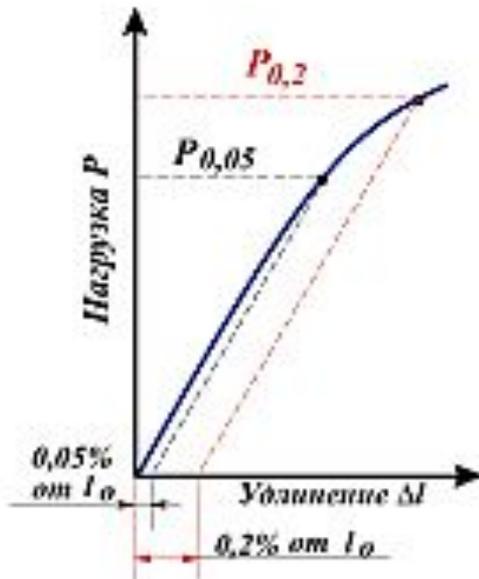


Предел пропорциональности - напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и деформацией достигает некоторой определенной величины

$$\sigma = \frac{P_{пц}}{F_0} \quad (\text{МПа})$$

где F_0 - исходная площадь поперечного сечения образца

По уменьшению $\text{tg } \alpha$ на 10, 25 и 50% определяют $\sigma_{пц10}$, $\sigma_{пц25}$ и $\sigma_{пц50}$ соответственно



Предел упругости - напряжение, при котором остаточная деформация достигает заданной величины. Остаточная деформация выбирается от 0,05 до 0,005%

При остаточной деформации 0,05%

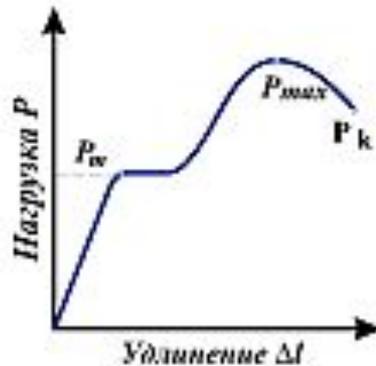
$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0} \quad (\text{МПа})$$

Условный предел текучести - напряжение, которому соответствует остаточная деформация, равная 0,2%

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} \quad (\text{МПа})$$

Испытания на растяжение

Характеристики прочности



Физический предел текучести - напряжение, при котором образец деформируется под действием неизменной нагрузки

$$\sigma = \frac{P_{тв}}{F_0} \quad (\text{МПа})$$

Предел прочности или временное сопротивление - условное напряжение, соответствующее максимальному усилию, которое может выдержать образец до разрушения.

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0} \quad (\text{МПа})$$

Характеристики пластичности

Относительное удлинение - $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100 \quad (\%)$
где l_0 - начальная длина образца,
 l_k - конечная длина образца.

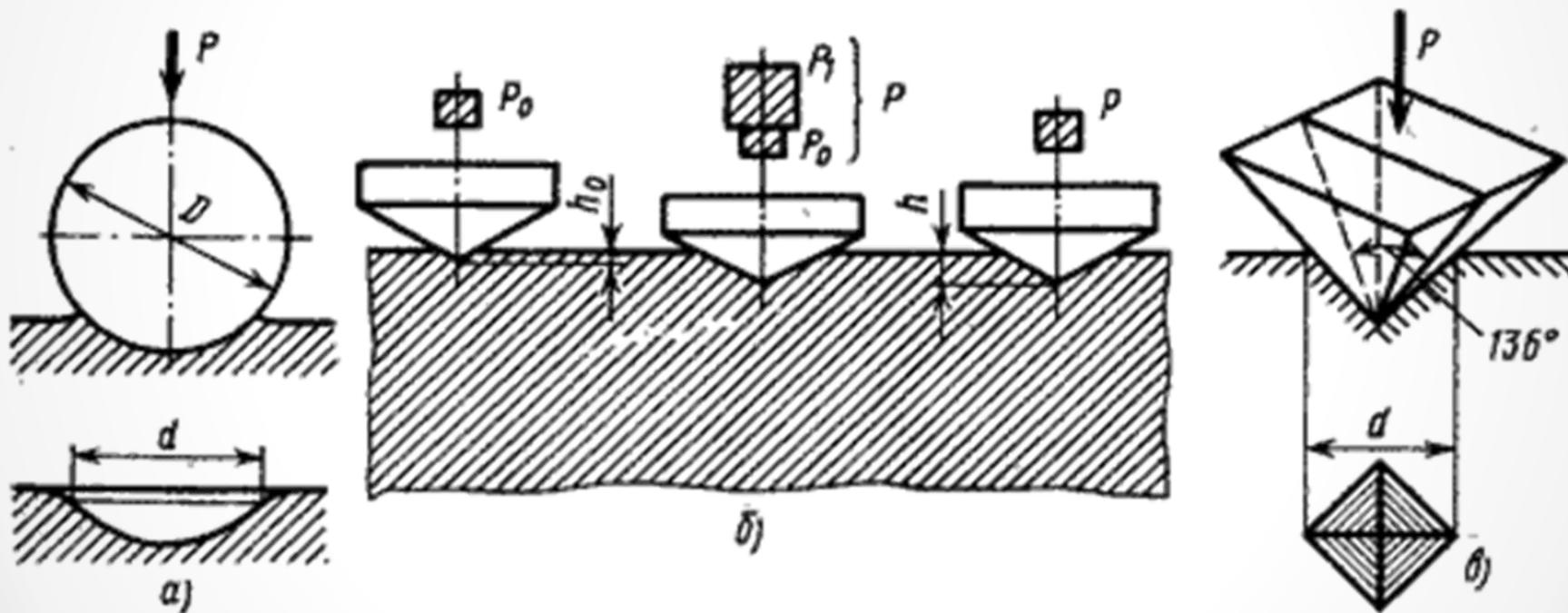
Относительное сужение - $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100 \quad (\%)$

где F_0 - исходная площадь поперечного сечения образца,
 F_k - площадь поперечного сечения образца в месте разрушения.

Испытание на твердость

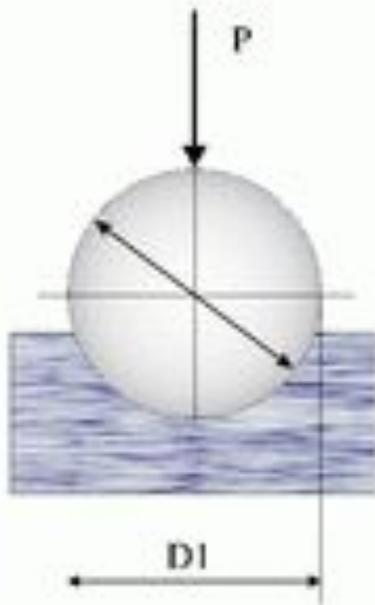
- **Твердость** – свойство материала оказывать сопротивление контактной деформации или хрупкому разрушению при внедрении индентора в его поверхность.
- **Индентор** - тело стандартного размера, которое вдавливается в образец.

Схемы определения твёрдости

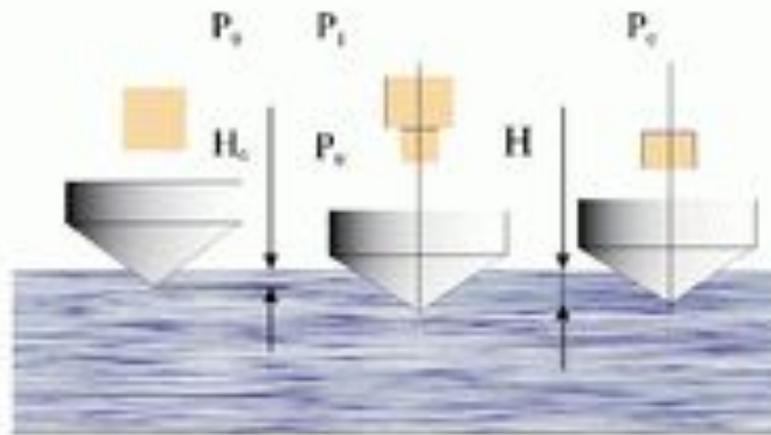


a – по Бринеллю; $б$ – по Роквеллу; $в$ – по Виккерсу

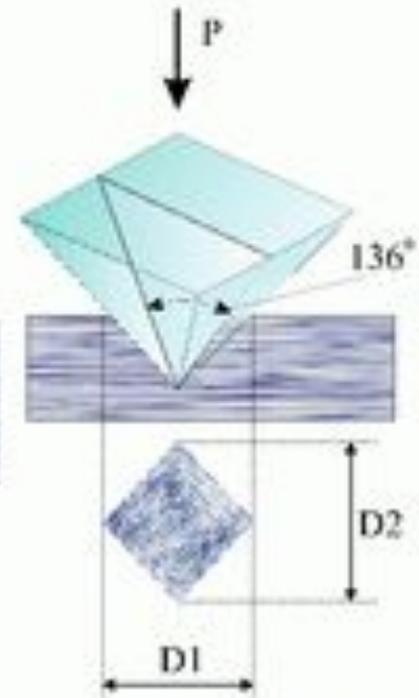
$$P = P_0 + P_1$$



По Бринеллю



По Роквеллу



По Виккерсу

Твердость по Бринеллю

Измерения твердости по Бринеллю

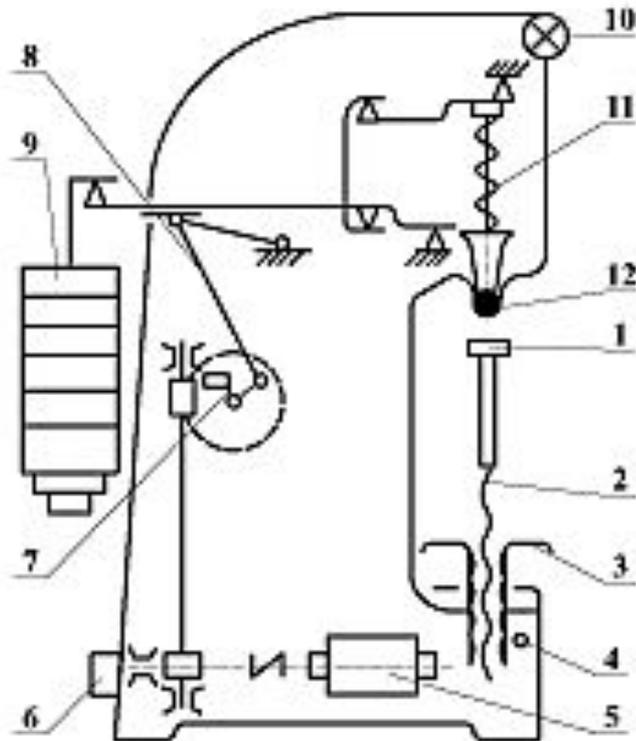


Схема прибора:
1 – станик; 2 – подъемный винт; 3 – маятник;
4 – пусковая катушка; 5 – электродвигатель;
6 – магнитный муфта; 7 – подающий упор;
8 – штамп; 9 – грузы; 10 – сигнальная лампа;
11 – пружина; 12 – оправка с шариком (индентор)



Индентор – стальной закаленный шарик диаметром D , равным 10, 5 или 2,5 мм;

Нагрузка – от $2,5 D^2$ до $30 D^2$ (кгс);

Время выдержки под нагрузкой – 10, 30 или 60 секунда

Число твердости по Бринеллю (НВ) – отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка

Метод Виккерса

С использованием алмазной четырехгранной пирамиды.

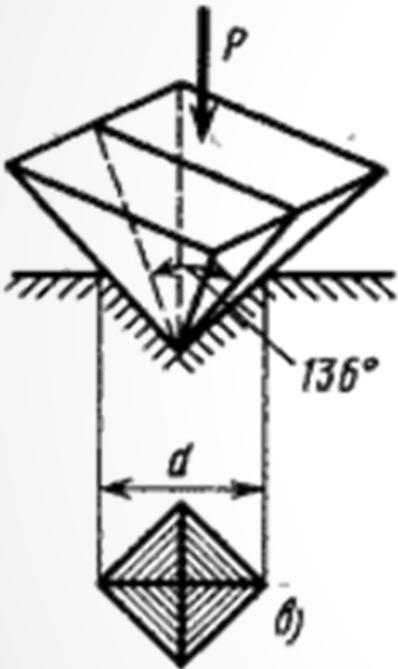
$P = 50 \dots 1000 \text{ Н}$

$t = 15 \text{ с.}$

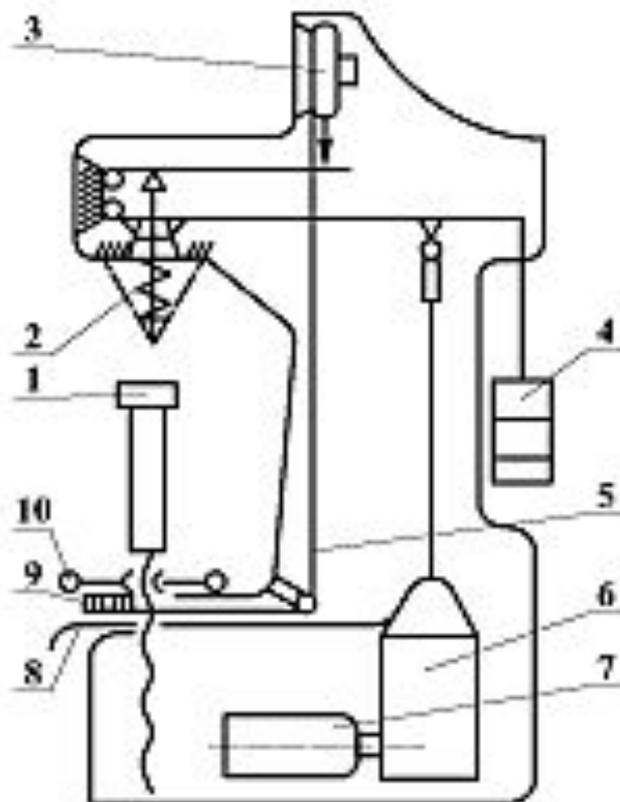
Диагональ отпечатка d измеряют для расчетов

Преимущества:

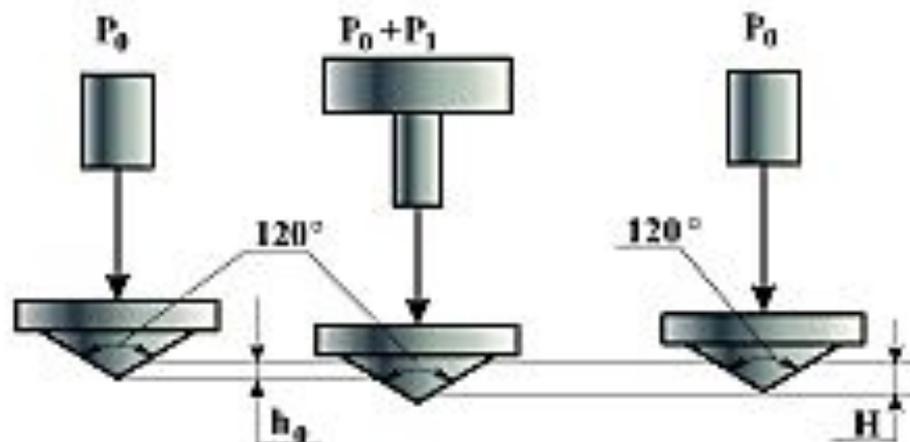
1. возможность измерения твердости любых материалов
2. измерение поверхностных слоев



Измерения твердости по Роквеллу



1 - стол; 2 - наконечник (индентор); 3 - индикатор; 4 - грузы; 5 - трос; 6 - редуктор; 7 - пружина; 8 - клавиша; 9 - барабан; 10 - маховик



Индентор – алмазный конус с углом 120° при вершине или стальной шарик диаметром 1,588 мм

P_0 – предварительная нагрузка (10 кг);

P_1 – основная нагрузка

Единица твердости по Роквеллу (HR) – безразмерная величина, соответствующая осевой перемещению индентора на 0,002 мм

Обозначение твердости	Индентор (наконечник)	Шкала индикатора	Полная нагрузка, кг
HRC HRA	алмазный конус	C A	150 60
HRB	стальной шарик	B	100

Метод Роквелла

- вдавливание в поверхность наконечника под определенной нагрузкой
- Индентор для мягких материалов (до HB 230) – стальной шар диаметром $d=1.6\text{мм}$, для более твердых материалов – алмазный конус $\alpha=120^\circ$.
- Нагружение в два этапа:
 - Сначала прикладывается предварительная нагрузка P_0 (10 кгс/100 Н)
 - Затем прикладывается основная нагрузка P_1 , в течение некоторого времени
- После снятия основной нагрузки определяют значение твердости по глубине остаточного вдавливания наконечника h под нагрузкой P_0 .
- В зависимости от природы материала используют три шкалы твердости

Три шкалы твердости по Роквеллу

Шкала	Обозначение	Индентор	Нагрузка, кг			Область применения
			P0	P1	P2	
A	HRA	Алмазный конус < 1200	10	50	60	Для особо твёрдых материалов
B	HRB	Стальной закаленный шарик Ø1/16"	10	90	100	Для относительно мягких материалов
C	HRC	Алмазный конус < 1200	10	140	150	Для относительно твёрдых материалов

Трещиностойкость

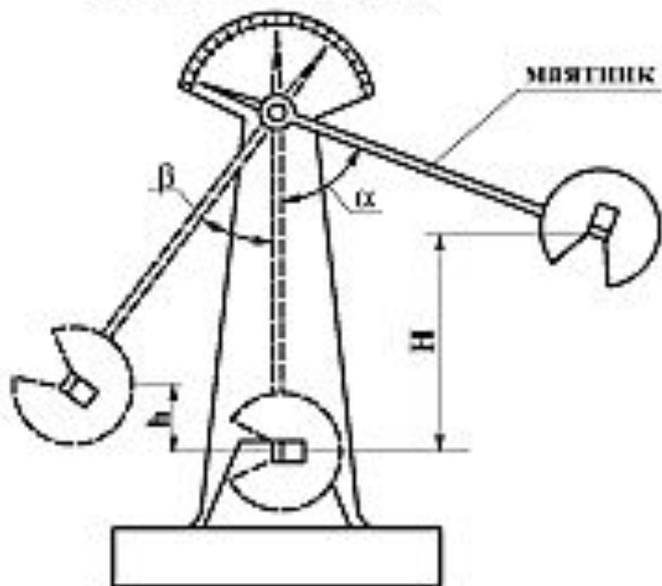
(при статическом нагружении)

- **Трещиностойкость** : способность материала конструкции сопротивляться образованию или развитию до заданных пределов в нем трещин под действием нагрузок, технологических и климатических воздействий.
- Трещины возникают как результат металлургии, так и при технологических воздействиях.
- Критическая трещиностойкость - критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плоской деформации в вершине трещины
- Для определения характеристик трещиностойкости испытывают с записью диаграмм "нагрузка-смещение" или "нагрузка-прогиб" образцы с предварительно нанесенной усталостной трещиной.

Механические свойства, определяемые при динамическом нагружении

Испытания на ударный изгиб

Схема испытаний



Ударная вязкость

$$K_C = \frac{K}{F} \text{ (МДж/м}^2\text{)}$$

K - работа удара, затраченная на пластическую деформацию и разрушение образца;

$$K = P(H - h) = PL(\cos\beta - \cos\alpha),$$

где P и L - вес и длина маятника соответственно

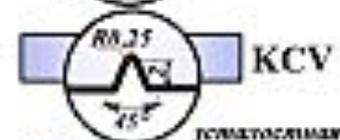
F - площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания.

Виды концентраторов на образце

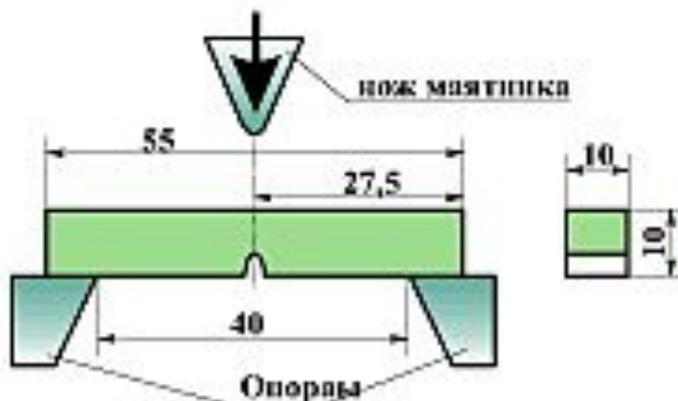
U - образный надрез



V - образный надрез



надрез с трещиной



Испытания на ударный изгиб

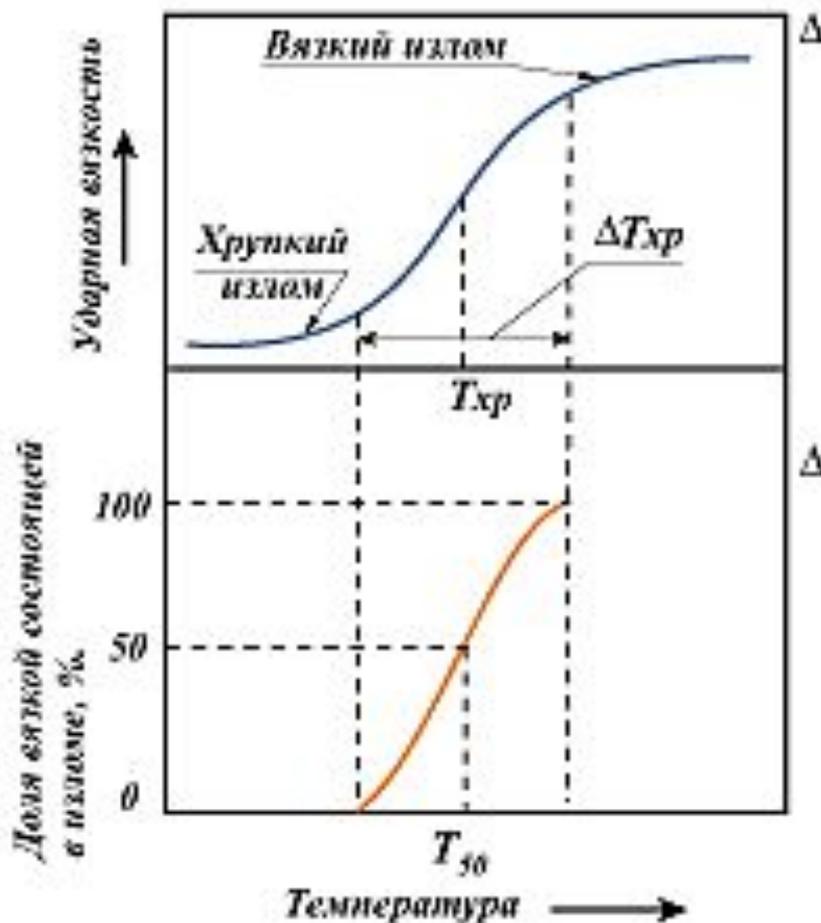
Составляющие ударной вязкости

$$K_C = K_{C_3} + K_{C_p}$$

K_{C_3} - работа зарождения трещины

K_{C_p} - работа распространения трещины

Порог хладноломкости



$\Delta T_{хр}$ – температурный интервал перехода от вязкого разрушения к хрупкому

$T_{хр}$ – порог хладоломкости, соответствующий середине интервала $\Delta T_{хр}$

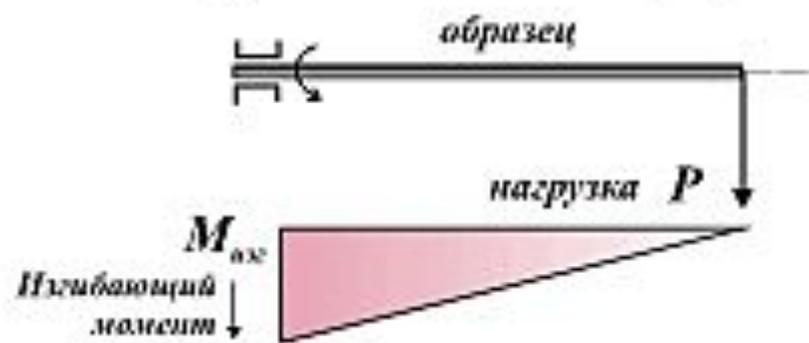
T_{50} – порог хладоломкости, соответствующая наличию 50% вязкой составляющей в изломе

Механические свойства при циклическом нагружении

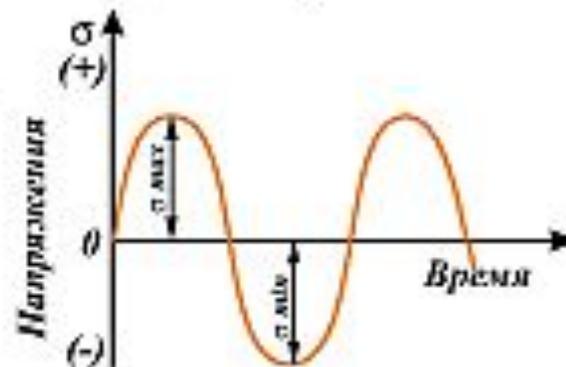
- **Усталость** – процесс постепенного накопления повреждений в металле при действии циклических нагрузок, приводящей к образованию трещин и разрушений.
- **Выносливость** – свойство противостоять усталости.
- **Сопротивление усталости** характеризует перелом
ВЫНОСЛИВОСТИ

Испытания на выносливость

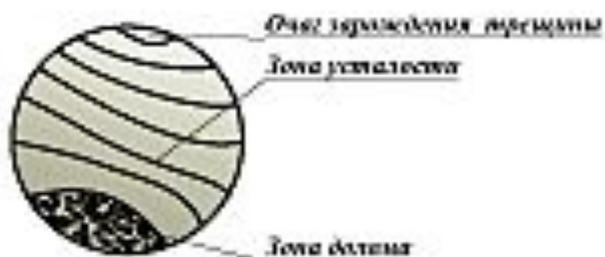
Схема нагружения – изгиб с вращением



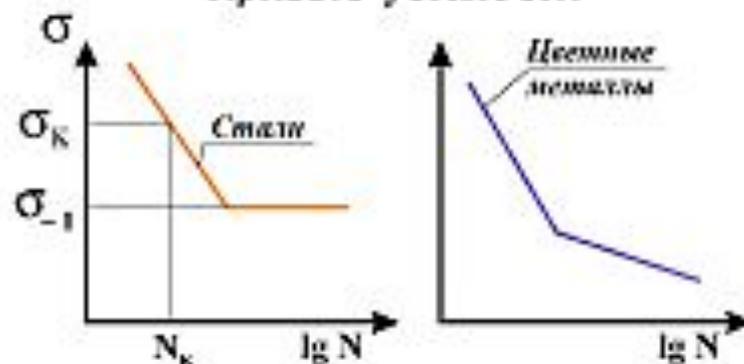
Цикл напряжений



Разрушение при усталости (схема)



Кривые усталости

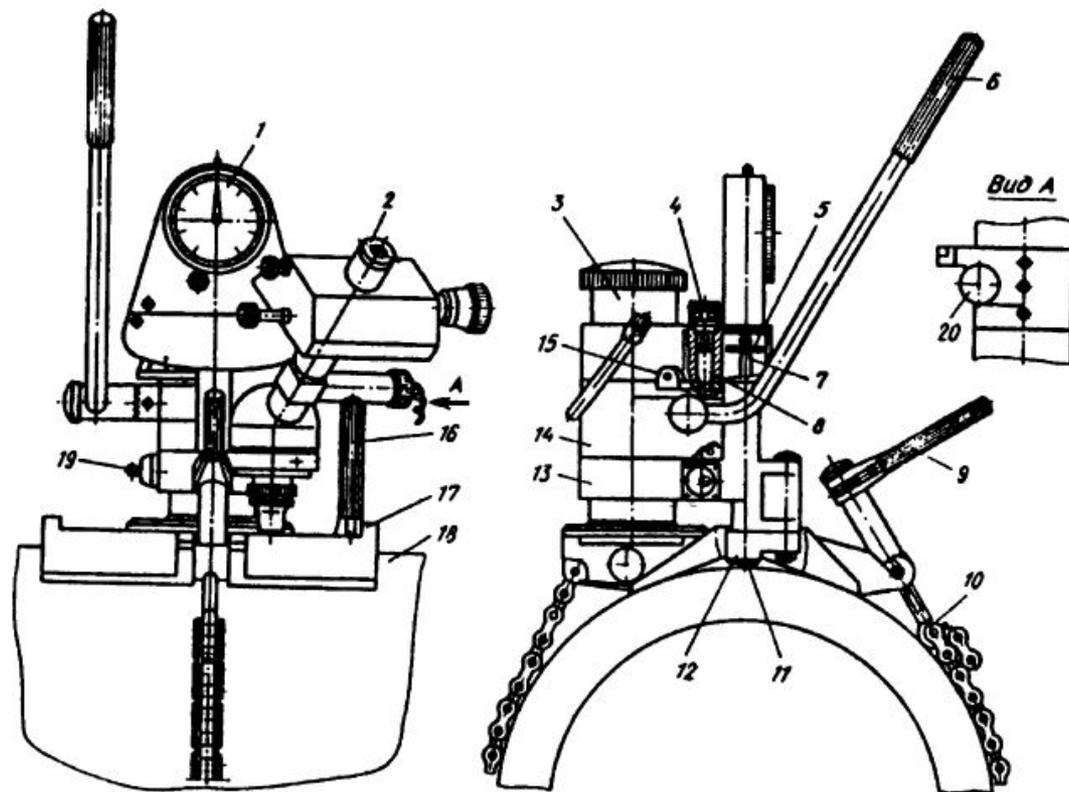


σ_{-1} - физический предел выносливости

σ_K - предел ограниченной выносливости при заданном количестве циклов до разрушения N_K

Безобразцовый метод определения механических свойств

- Безобразцовый метод основан на инденторных испытаниях материалов, в результате которых определяют специальные характеристики твердости и пересчитывают их на показатели других механических свойств.
- Достоинство данного способа определения параметров металла состоит в том, что можно быстро оценить механические характеристики готового изделия, не выводя его из строя и не вырезая из них образцов.
- Представляет большой научный и практический интерес в области исследования, контроля и диагностики качества металла. В некоторых случаях это единственный пригодный для оценки механических свойств малых объёмов или локальных зон обработанного металла (уплощенный слой, сварные соединения). Эффективен для определения остаточного ресурса оборудования, проработавшего длительное время в эксплуатации и выработавшего свой расчетный срок службы.
- **Принцип работы.**
- Используется диаграмма непрерывного вдавливания индентора, которую можно аппроксимировать степенной зависимостью
- $\rho = a \cdot d^n$, где
- ρ - нагрузка вдавливания
- d - диаметр остаточного отпечатка
- a, n - коэффициенты, характеризующие материал
- $A = a \cdot \Delta^{(n-2)}$, a зависит от Δ , n -коэффициент
- И отсюда следует автоматизация расчетов.
- Исходя из диаграммы, по формулам определяют механические характеристики. Используя МЭИ-Т7, можно управлять измерениями дистанционно.



Прибор, закрепленный на трубопроводе для оценки его состояния

Технологические и эксплуатационные свойства. Методы определения

Технологические свойства характеризуют способность материала подвергаться различным способам холодной и горячей обработки.

1. Литейные свойства.

Характеризуют способность материала к получению из него качественных отливок.

Жидкотекучесть – характеризует способность расплавленного металла заполнять литейную форму.

Усадка (линейная и объемная) – характеризует способность материала изменять свои линейные размеры и объем в процессе затвердевания и охлаждения.

Ликвация – неоднородность химического состава по объему.

2. Способность материала к обработке давлением.

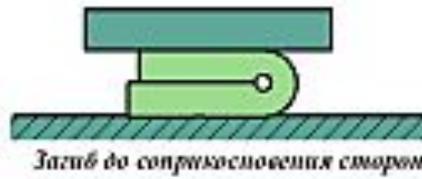
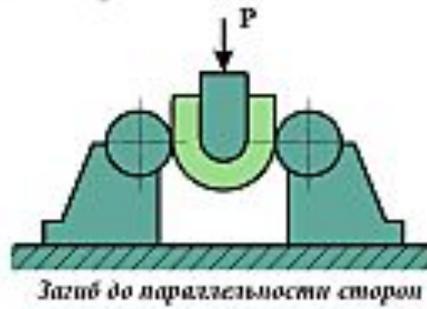
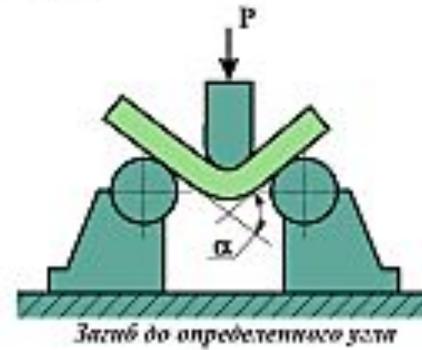
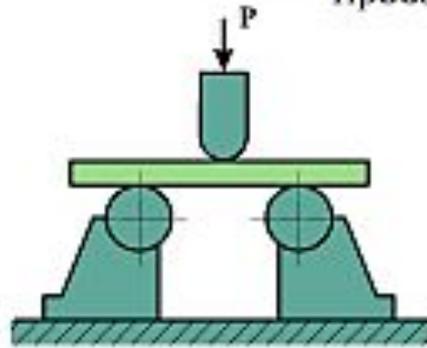
Это способность материала изменять размеры и форму под влиянием внешних нагрузок не разрушаясь.

Листовой материал испытывают на *перегиб и вытяжку* сферической лунки.

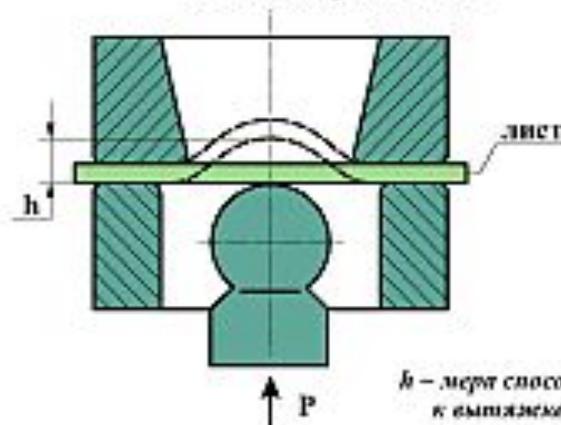
Проволоку испытывают на *перегиб, скручивание, на навивание*.

Трубы испытывают на *раздачу, сплющивание* до определенной высоты и *изгиб*.

Технологические испытания
Проба на изгиб



Испытания на вытяжку сферической лунки
(метод Эриксона)



h – мера способности материала к вытяжке

Эксплуатационные свойства

1. *Износостойкость* – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения.
2. *Коррозионная стойкость* – способность материала сопротивляться действию агрессивных кислотных, щелочных сред.
3. *Жаростойкость* – это способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре.
4. *Жаропрочность* – это способность материала сохранять свои свойства при высоких температурах.
5. *Хладостойкость* – способность материала сохранять пластические свойства при отрицательных температурах.
6. *Антифрикционность* – способность материала прирабатываться к другому материалу