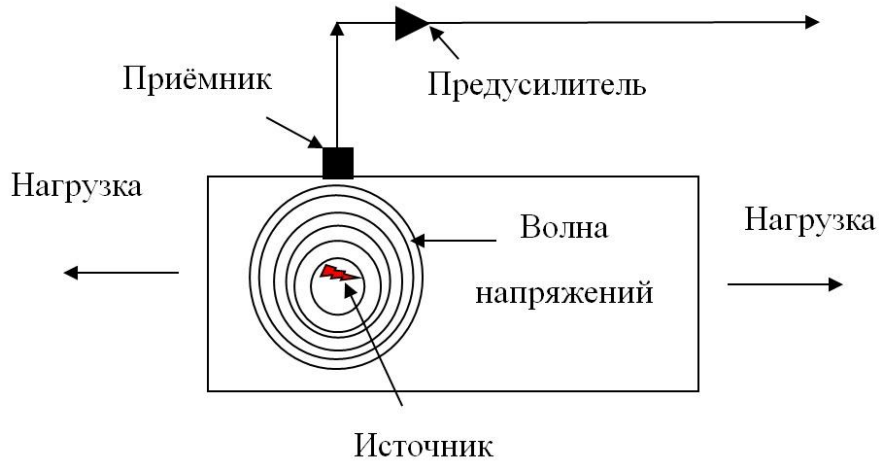


Основные этапы, методы и информационные параметры оперативной диагностики структурно-механического состояния материалов

N	ЭТАПЫ	МЕТОДЫ	ПАРАМЕТРЫ
1	Контроль конструкций и элементов оборудования физическими методами	Акустическая эмиссия (АЭ), ультразвуковой контроль (УЗК), вихретоковый контроль (ВТК), магнитные методы и др.	Аномальные зоны с выбросами сигналов физических характеристик
2	Контроль структуры и физико-механических свойств материала в выявленных аномальных зонах	Микроанализ металла, безобразцовые методы контроля механических свойств /разрушающие испытания	Параметры микроструктуры (наличие микротрещин и др.), механические свойства (характеристики твердости, прочности и др.)
3	Анализ и прогноз структурно-механического состояния материала	Расчетно-статистические методы обработки экспериментальных данных	Предельно допускаемые значения физико-механических и структурных характеристик металла

Акустические методы

Метод акустической эмиссии (АЭ)



Ультразвуковой контроль (УЗК)

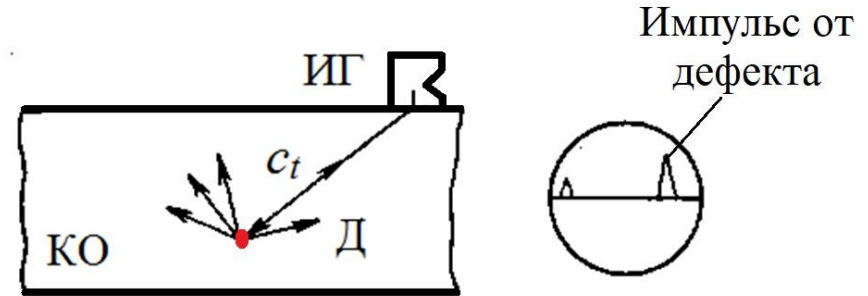
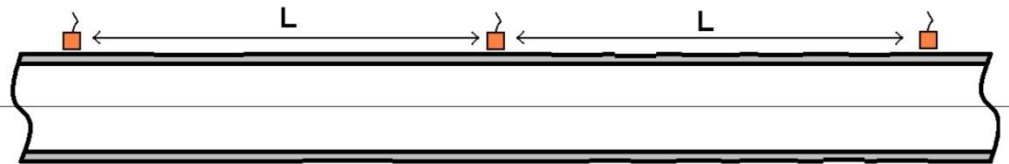


Схема ультразвуковой дефектоскопии:
ИГ – искательная головка; КО – контролируемый объект; Д - дефект

Принципиальная схема реализации метода АЭ



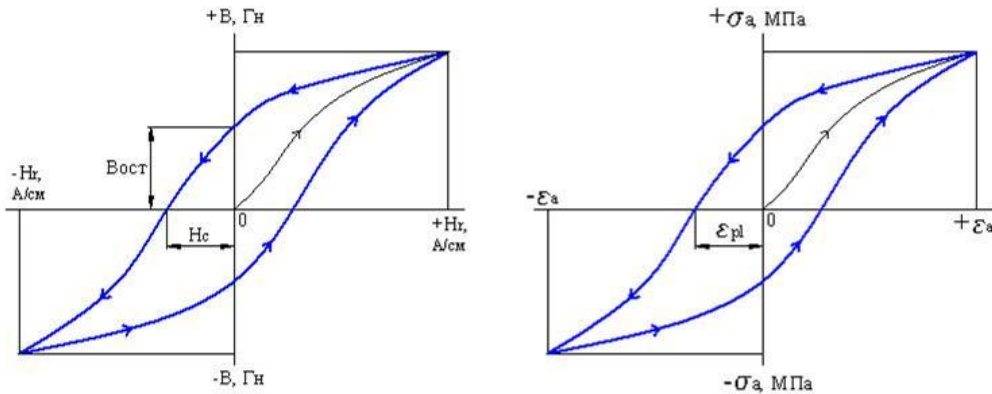
Контроль трубопровода методом АЭ



Ультразвуковая толщинометрия на отрезке экранной трубы котла (ГОСТ Р ИСО 16809-2015)

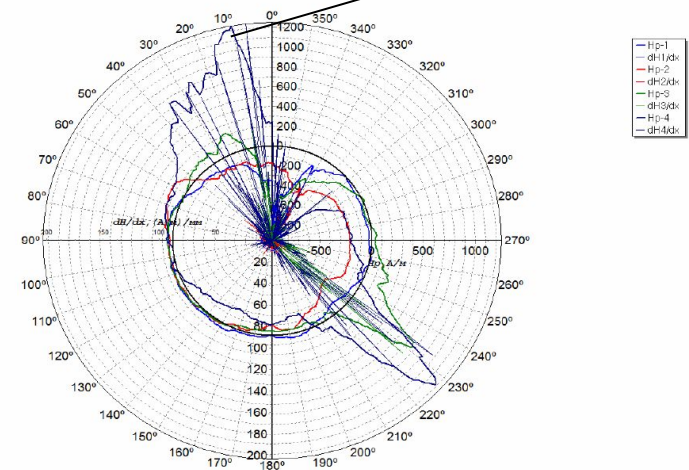
Магнитные методы

Коэрцитиметрия (измерение коэрцитивной силы)



Магнитно-механическая аналогия:
магнитная петля гистерезиса (а) и
деформационная петля гистерезиса при
циклическом нагружении (б)

Магнитная память металла (УЗК)

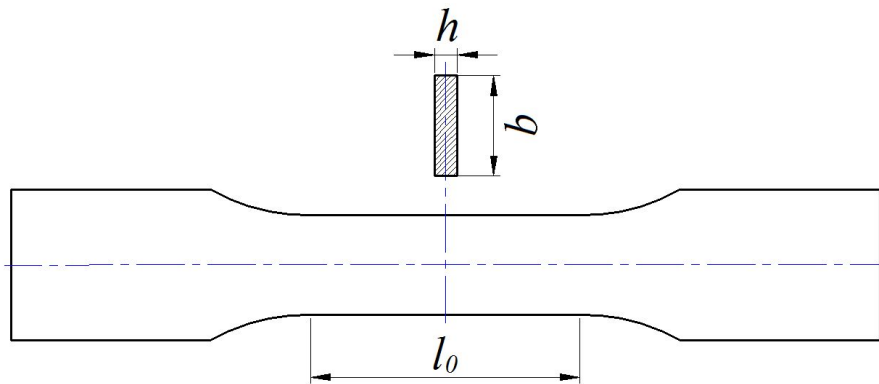


Магнитограмма кольцевого сварного
соединения с выявлением зон
концентрации напряжений

Разрушающие испытания. Испытания растяжением (ГОСТ 1497-84)

Образцы для испытаний растяжением

Плоские образцы

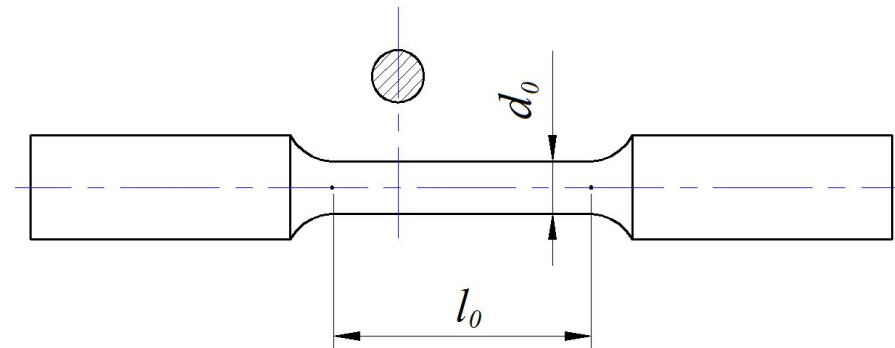


«Короткие»: $l_0 = 5.65\sqrt{F_0}$

«Длинные»: $l_0 = 11.3\sqrt{F_0}$

$$F_0 = b \cdot h$$

Цилиндрические образцы

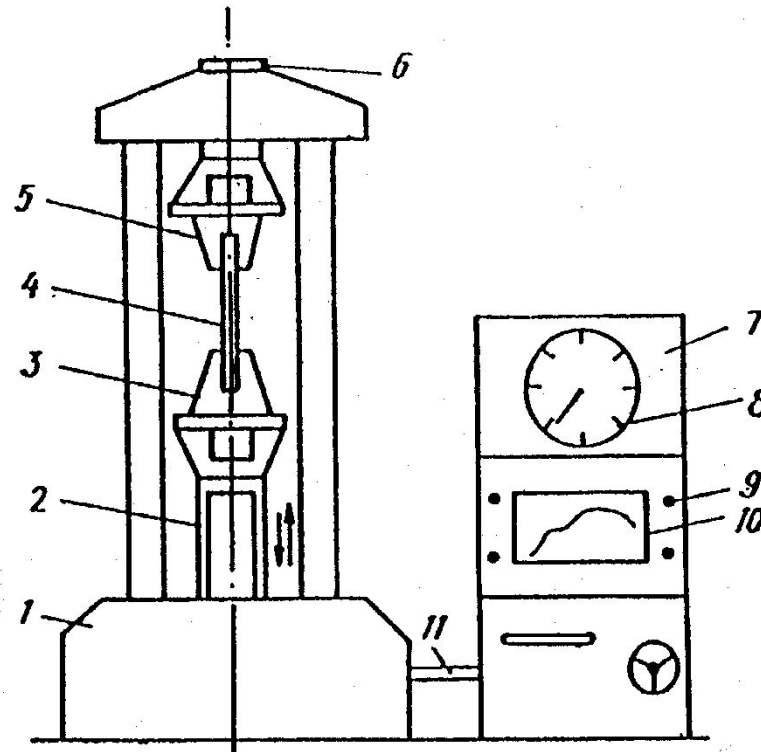


Кратность образца:

$$K = \frac{l_0}{d_0} = 2.5; 5; 10.$$

Разрушающие испытания. Испытания растяжением (ГОСТ 1497-84)

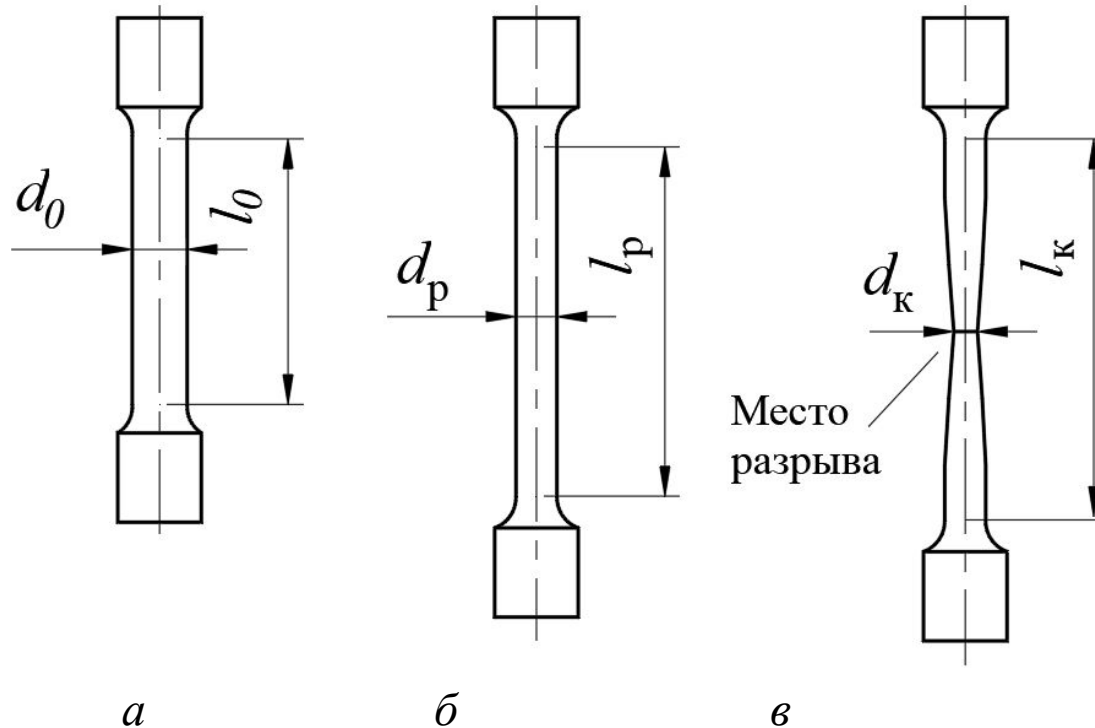
Схема машины для испытания на растяжение



1 – основание; 2 – винт грузовой; 3 – нижний захват (активный); 4 – образец; 5 – верхний захват (пассивный); 6 – силоизмерительный датчик; 7 – пульт управления с электроприводной аппаратурой; 8 – индикатор нагрузок; 9 – рукоятки управления; 10 – диаграммный механизм; 11 – кабель

Разрушающие испытания. Испытания растяжением (ГОСТ 1497-84)

Схемы цилиндрического образца на различных стадиях растяжения



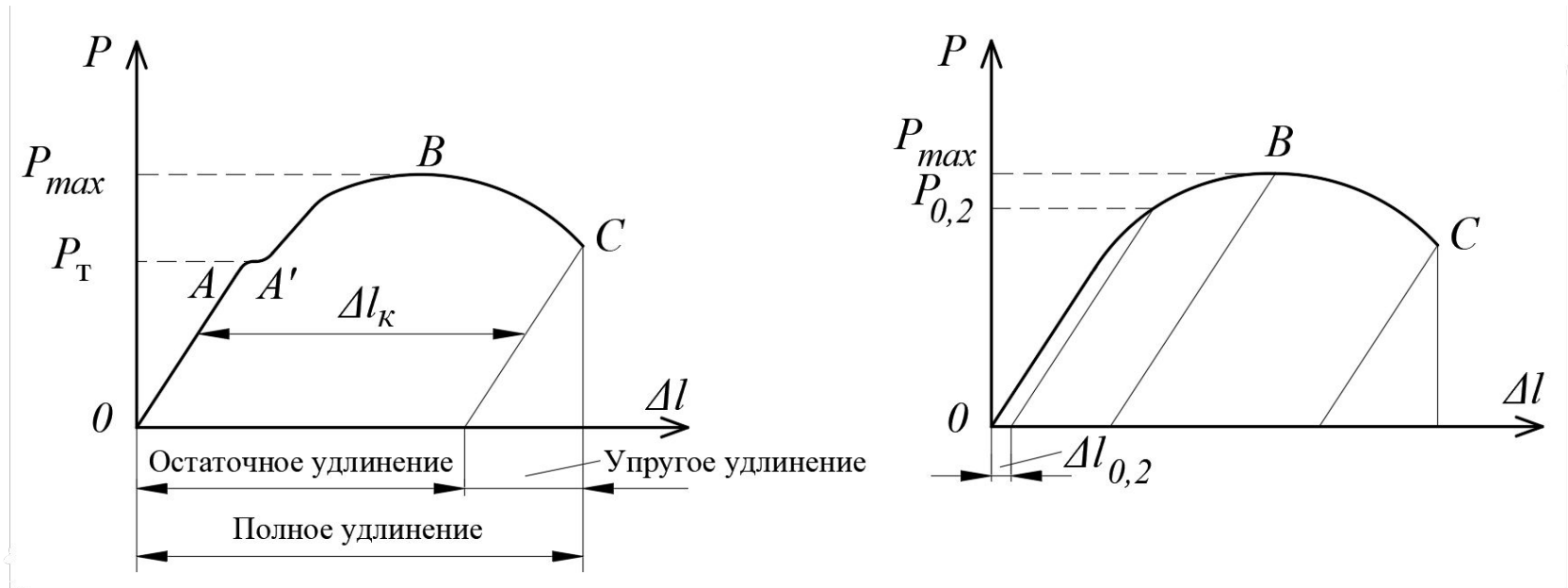
а – образец до испытания (l_0 и d_0 — начальные длина и диаметр);

б – образец, растянутый до максимальной нагрузки;

в – образец после разрыва (l_k — конечная длина; d_k — минимальный диаметр в месте разрыва)

Разрушающие испытания. Испытания растяжением (ГОСТ 1497-84)

**Схемы машинных (первичных) диаграмм растяжения пластичных материалов:
а – с площадкой текучести; б – без площадки текучести**



Характеристики прочности

Физический предел текучести	$\sigma_T = P_T / F_0$	}	МПа
Условный предел текучести	$\sigma_{0.2} = P_{0.2} / F_0$		
Временное сопротивление (предел прочности)	$\sigma_B = P_{max} / F_0$		

Характеристики пластичности

Относительное конечное удлинение

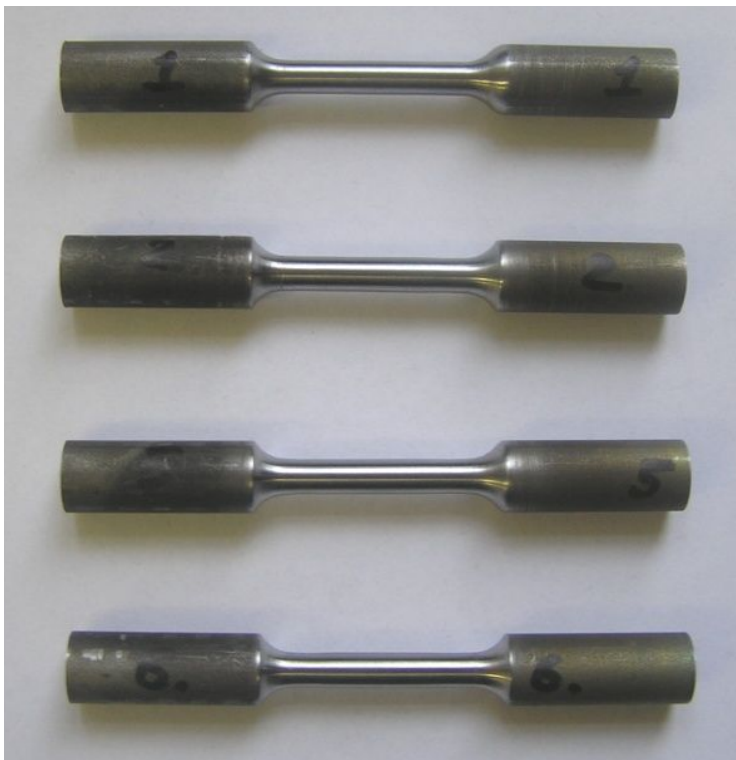
$$\delta_K = (\Delta l_K / l_0) \cdot 100 = [(l_K - l_0) / l_0] \cdot 100, \%$$

Относительное конечное сужение

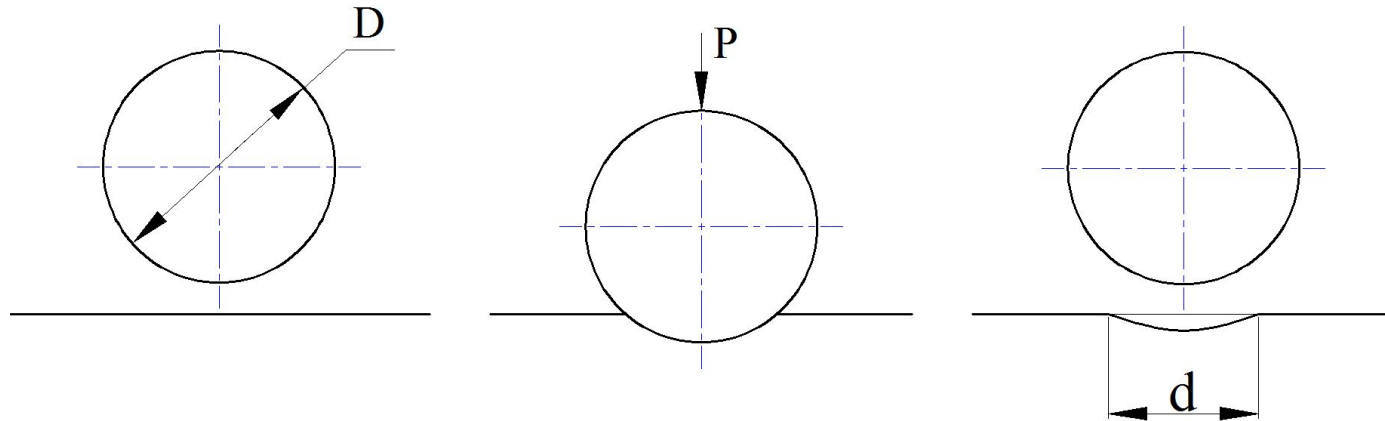
$$\psi_K = (\Delta F_K / F_0) \cdot 100 = [(F_0 - F_K) / F_0] \cdot 100, \%$$

Разрушающие испытания. Испытания растяжением (ГОСТ 1497-84)

Образцы для испытаний растяжением до и после испытаний



Метод Бринелля (ГОСТ 9012–59)



$D = 1; 2; 2,5; 5$ или 10 мм

Для сталей $P = 30D^2$

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

Пример записи числа твердости по Бринеллю:

225 HB 2,5/187,5/10

Твердость,
кГс/мм²

Диаметр
индентора,
мм

Нагрузка,
кГс

Время под
нагрузкой, с

Метод Бринелля (ГОСТ 9012–59)



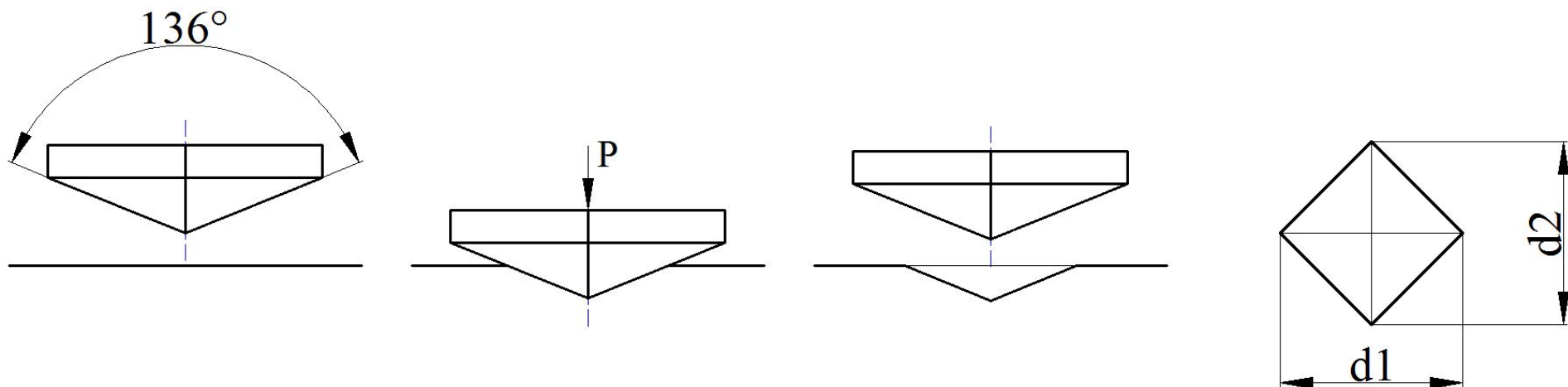
Твердомер Бринелля ТШ-2М



Инденторы Бринелля разных диаметров в оправках

Испытания на твердость

Метод Виккерса (ГОСТ 2999–75)



$P = 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30$ или 50 кгс

Пример записи числа твердости по Виккерсу:

135 HV 2/10

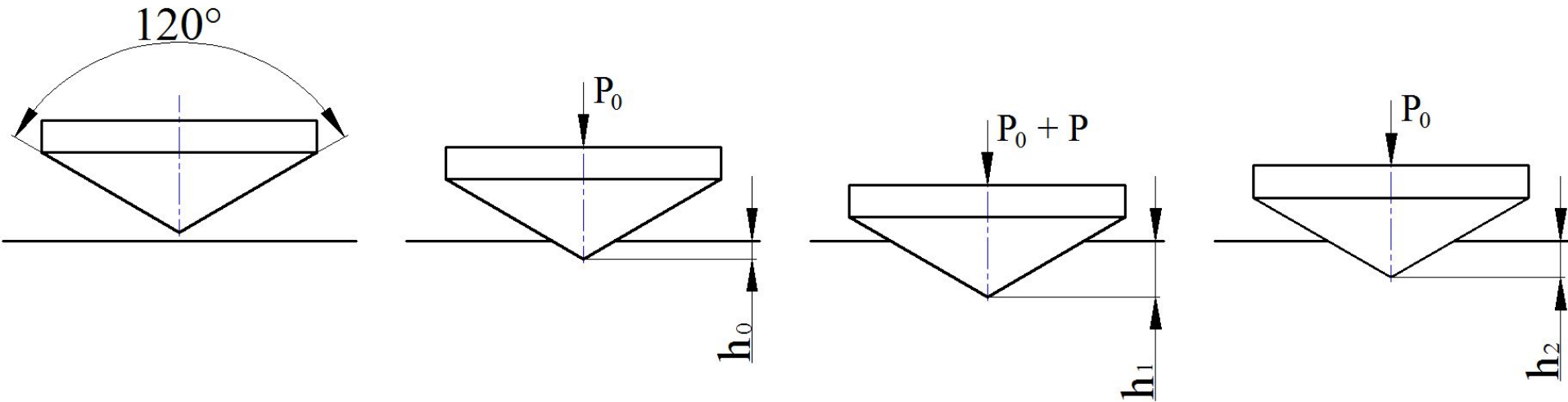
Твердость,
кгс/мм²

Нагрузка,
кгс

Время под
нагрузкой, с

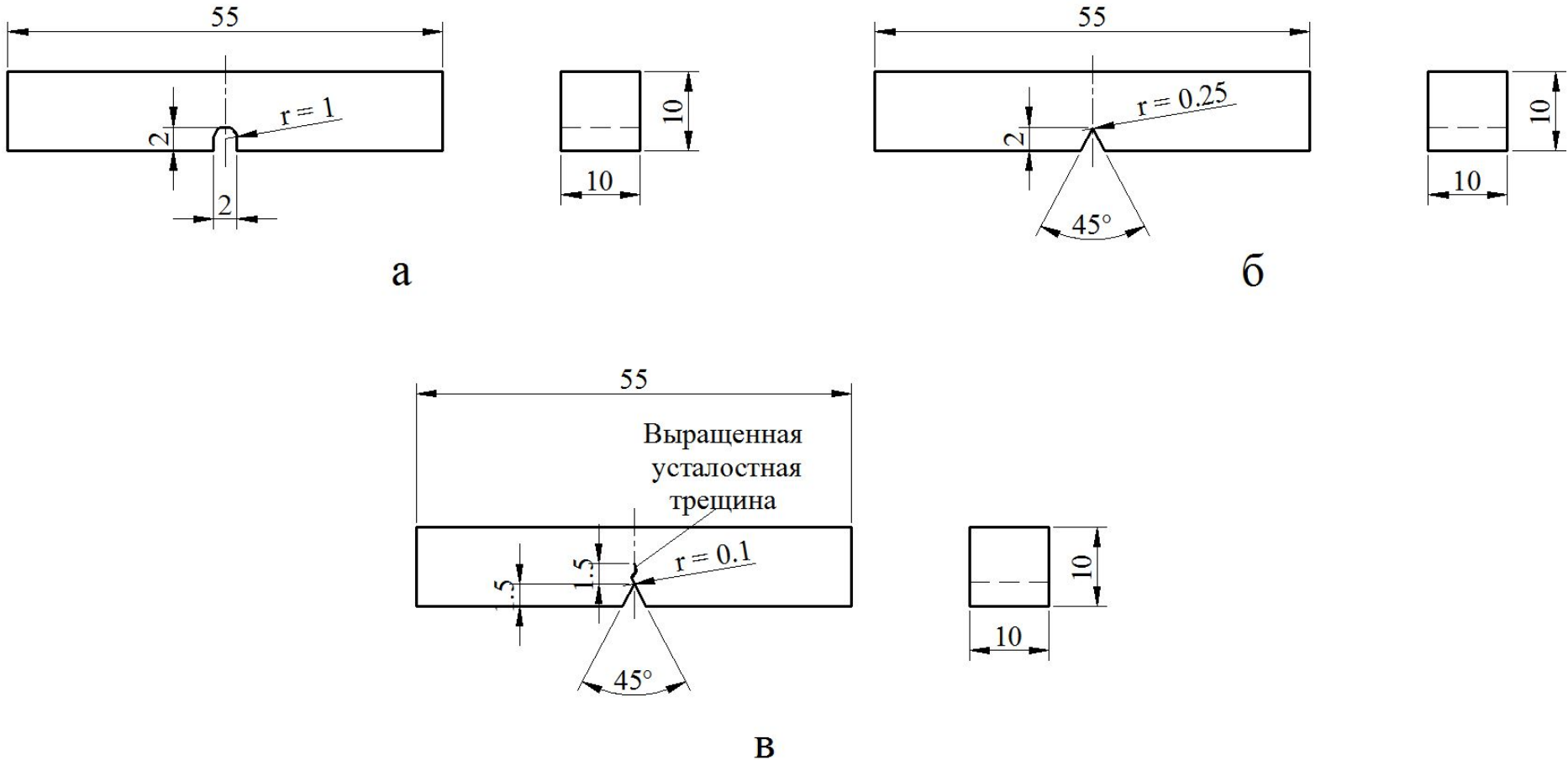
$$HV = \frac{P}{M} = \frac{P}{\left(\frac{d^2}{2 \sin(\alpha / 2)} \right)} \approx \frac{1,8544P}{d^2}.$$

Метод Роквелла (ГОСТ 9013–59)



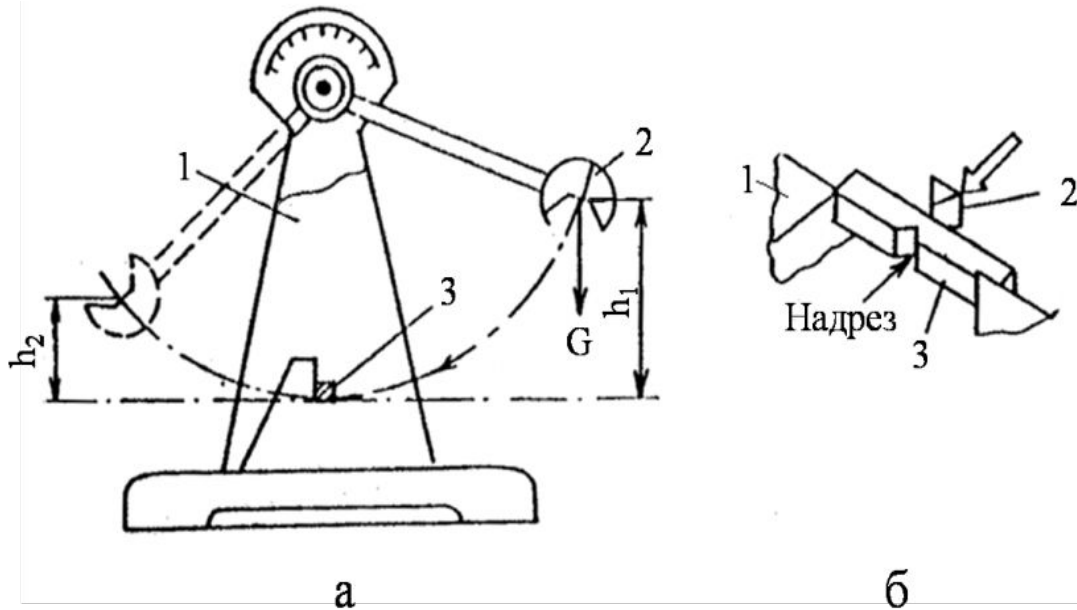
Шкала	Индентор	P_0 , кГс	P , кГс	$P_{общ}$, кГс	Формула расчета	Пример записи
A	конус		50	60	$HRA = 100 - (h_2 - h_1)/0,002$	61 HRA
B	шар $D = 1,588$ мм	10	90	100	$HRB = 130 - (h_2 - h_1)/0,002$	44 HRB
C	конус		140	150	$HRC = 100 - (h_2 - h_1)/0,002$	37 HRC

Схема образцов для испытаний на ударный изгиб



а – образец с U-образным надрезом; *б* – с V-образным надрезом; *в* – с усталостной трещиной

Схема испытания на ударный изгиб



a – схема маятникового копра (1 – корпус; 2 – маятник; 3 – образец); *б* – расположение образца

Работа K , МДж, затраченная на ударный излом образца

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

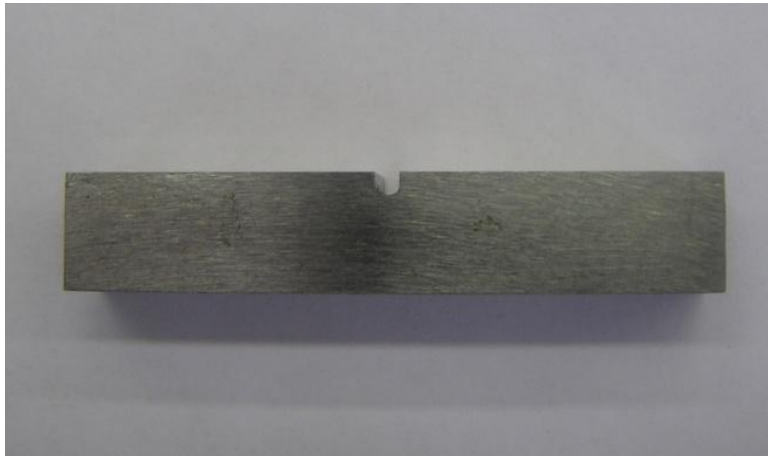
G – вес маятника; h_1, h_2 – высота подъема маятника до испытания и после него.

Ударная вязкость:

$$KCU, KCV, KCT = K/F$$

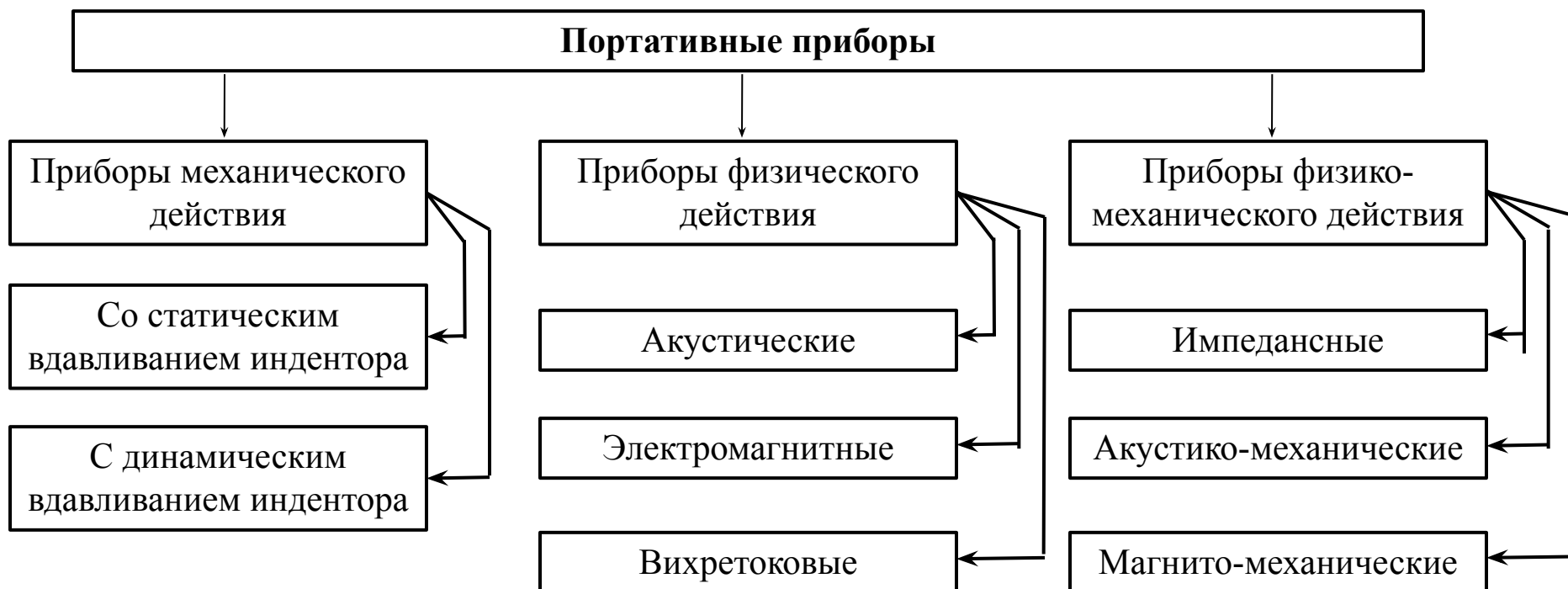
F – площадь поперечного сечения образца в надрезе

Образцы на ударный изгиб до и после испытаний



Проблемы диагностики фактического состояния металла энергетического оборудования и трубопроводов

- отсутствие «универсального» физического метода выявления дефектов и зон концентрации напряжений в металле;
- отсутствие надежных портативных приборов и методик, позволяющих производить оценку комплекса физико-механических свойств металла в промышленных условиях.



Некоторые представленные на рынке портативные приборы для оценки механических свойств металла



Inatest-D

Преимущества:

- Малая масса (до 1 кг), удобство и простота использования.
- Высокая производительность испытаний.

Недостатки:

- Косвенные способы оценки твёрдости, основанные на корреляции твёрдости с различными физическими параметрами.
- Зависимость результатов испытаний от массы и жёсткости изделий, а также от ориентации их в пространстве.



ТЭМП-4

Оценка фактических значений физико-механических свойств металла с достаточной точностью возможна только при использовании **твердомера прямого действия**, обеспечивающего необходимые параметры испытания согласно действующим **нормативным документам**.

Приборы для определения механических свойств металла, разработанные в МЭИ



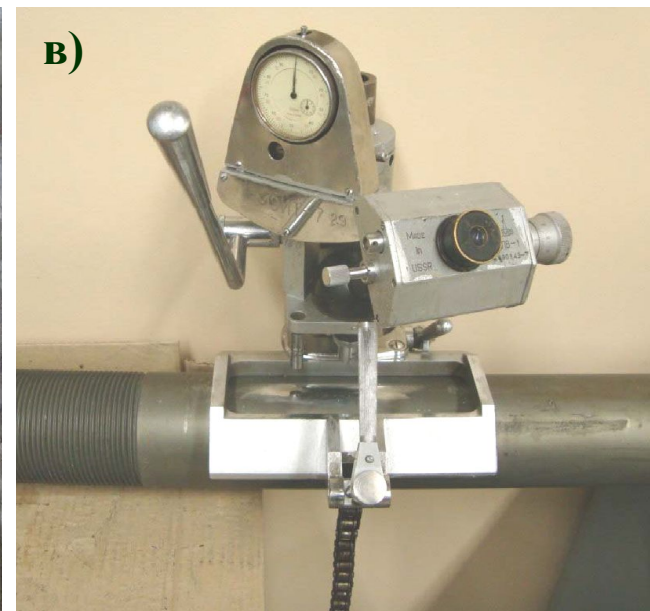
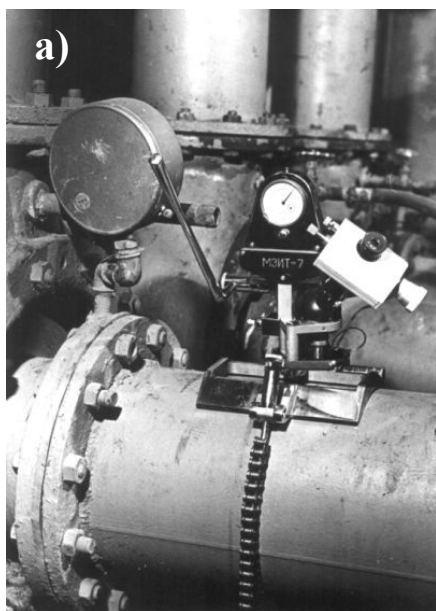
МЭИ-T7



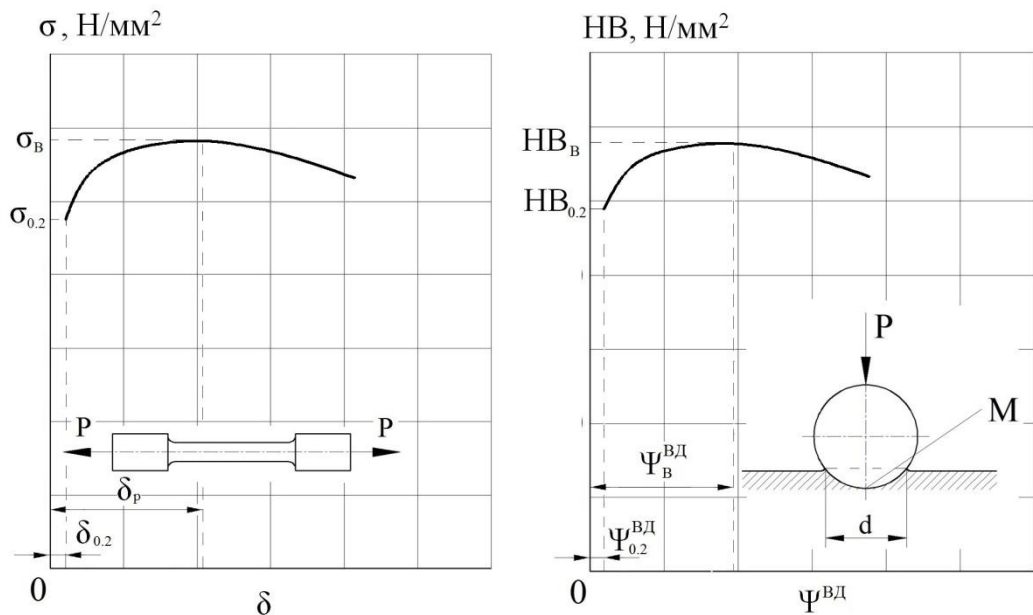
МЭИ-T8



МЭИ-T12







Определяемые характеристики прочности и пластичности:

- Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$:

$$\sigma_{0.2} = b \cdot (HB_{0.2})^c$$

- Временное сопротивление σ_B :

$$\sigma_B = k \cdot HB_B$$

- Предельное равномерное удлинение δ_p .

$$\delta_p = f(\sigma_B / \sigma_{0.2})$$

Условная диаграмма растяжения в координатах « $\sigma - \delta$ » (а) и диаграмма вдавливания шара в координатах «твёрдость по Бринеллю HB – средняя контактная деформация $\Psi_{ВД}$ » (б)

Возможности индентирования для определения механических свойств материалов

- Проведение входного экспресс-контроля качества материалов.
- Определение механических свойств на этапе производства, на готовых изделиях, после эксплуатации.

Преимущества:

- Определение твёрдости прямым способом под нагрузкой, регламентированной ГОСТ.
- Возможность регистрации диаграмм вдавливания и преобразования их в диаграммы растяжения.
- Возможность определения твёрдости и комплекса других механических характеристик (E , $\sigma_{0.2}$, σ_B и др.).
- Обеспечение требуемой точности.

Недостатки:

- Сравнительно большая масса (5 – 25 кг).
- Необходимость использования специальных приспособлений для жёсткого крепления к изделиям.
- Сложность использования в труднодоступных местах.
- Сравнительно низкая производительность испытаний.

Погрешности определения твёрдости по Бринеллю НВ переносными и портативным приборами по сравнению со стационарным прибором ТШ-2М

Контролируемая деталь	Средние значения твердости НВ и погрешности $ \Delta $, %								
	ТШ-2М	МЭИ-Т7	$ \Delta $, %	МЭИ-Т8	$ \Delta $, %	Inatest-D	$ \Delta $, %	ТЭМП-4	$ \Delta $, %
Лопатка паровой турбины	229	227	0,87	220	3,9	201	12,2	236	3,06
Шпилька М12	264	266	0,7	267	1,14	173	34,0	155	41,0
Шпилька М60	231	232	0,43	239	3,5	252	8,7	275	19,0
Шпилька М90	210	212	0,95	203	3,3	153	27,1	147	30,0
Труба $\varnothing 160 \times 5$	111	114	2,7	116	4,5	38	24,3	25	77,4