



«Методы определения твёрдости и прочности материалов»

Лекция 4

**Характеристика основных
методов оценки
твёрдости.**

**Профессор Мощенок В.И.
Доцент Лалазарова Н.А.**

Содержание



4.1. Твёрдость по Бринеллю



4.2. Твёрдость по Роквеллу



4.3. Твёрдость по Виккерсу



4.4. Твёрдость индентирования



4.5. Метод среднего контактного давления



4.6. Твёрдость по Мартенсу



4.7. Анализ методов оценки твёрдости с помощью диаграммы индентирования

4.1. Твёрдость по Бринеллю

Метод определения твердости по Бринеллю известен с 1901 г., т.е. почти с момента появления понятия «твердость». До настоящего времени этот метод претерпел значительное развитие в части его градации по шкалам в зависимости от условий испытаний. Используют более 30 шкал твердости.

Сложность выбора шкалы твердости определяется не только их многообразием, но и различиями в рекомендациях их выбора.

ГОСТ 9012–59, практически широко используемый сегодня на производстве, рекомендует выбор шкалы и, соответственно, условий испытаний осуществлять **в зависимости от следующих групп металлов и сплавов:**

- сталь, чугун, высокопрочные сплавы;
- титан и сплавы на его основе;
- медь и сплавы на ее основе;
- подшипниковые сплавы;
- свинец, олово и т.п. сплавы.

Шкалы твердости по методу Бринелля

№ п/п	Обозначение шкалы	Условия испытаний			Применение шкалы в национальных и международных стандартах		
		диаметр шарика, мм	усилие вдавливания, Н	отношение усилия к квадрату диаметра шарика, К	ДСТУ ISO 6506-1:2007 (Украина) [94]	ASTM E 10-10 (США) [95]	ISO 6506-1 (международный) [96]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	HBW 10/3000	10	29420	30	*	*	*
2	HBW 10/1500	10	14710	15	*	*	*
3	HBW 10/1000	10	9807	10	*	*	*
4	HBW 10/500	10	4903	5	*	*	*
5	HBW 10/250	10	2452	2,5	*	*	*
6	HBW 10/125	10	1226	1,25		*	
7	HBW 10/100	10	980,7	1	*	*	*
8	HBW 5/750	5	7355	30	*	*	*
9	HBW 5/250	5	2452	10	*	*	*
10	HBW 5/125	5	1226	5	*	*	*
11	HBW 5/62,5	5	612,9	2,5	*	*	*
12	HBW 5/31,25	5	306,5	1,25		*	
13	HBW 5/25	5	245,2	1	*	*	*
14	HBW 2,5/187,5	2,5	1839	30	*	*	*
15	HBW 2,5/62,5	2,5	612,9	10	*	*	*
16	HBW 2,5/31,25	2,5	306,5	5	*	*	*
17	HBW 2,5/15,625	2,5	153,2	2,5	*	*	*

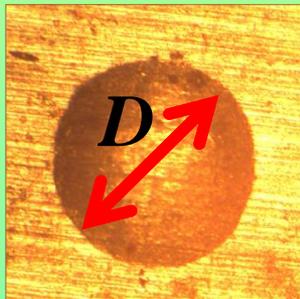
Шкалы твердости по методу Бринелля

1	2	3	4	5	6	7	8
18	HBW 2,5/7,8125	2,5	76,61	1,25		*	
19	HBW 2,5/6,25	2,5	61,29	1	*	*	
20	HBW 1/30	1	294,2	30	*	*	
21	HBW 1/10	1	98,07	10	*	*	
22	HBW 1/5	1	49,03	5	*	*	
23	HBW 1/2,5	1	24,52	2,5	*	*	
24	HBW 1/1,25	1	12,26	1,25		*	
25							

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО МЕТОДУ БРИНЕЛЛЯ



Твердомер Бринелля



HBW 10/3000
HBW 10/1500
HBW 10/1000
HBW 10/500
HBW 10/250
HBW 10/125
HBW 10/100
HBW 5/750
HBW 5/250
HBW 5/125
HBW 5/62,5
HBW 5/31,25
HBW 5/25
HBW 2,5/187,5
HBW 2,5/62,5
HBW 2,5/31,25
HBW 2,5/15,625
HBW 2,5/7,8125
HBW 2,5/6,25
HBW 2/187,5
HBW 2/62,5
HBW 2/31,25
HBW 2/15,625
HBW 2/7,8125
HBW 1/30
HBW 1/10
HBW 1/5
HBW 1/2,5
HBW 1/1,25
HBW 1/1

P=30 D ²		P=10 D ²		P=5 D ²		P=2,5 D ²		P=1 D ²	
кгс	Н	кгс	Н	кгс	Н	кгс	Н	кгс	Н
187,5	1840	62,5	613	31	307	15,5	153	6,2	61,5
Железо, сталь, чугун и высокопрочные сплавы		Медь, никель, и их сплавы		Алюминий, магниевый и их сплавы		Подшипниковые сплавы		Олово, свинец	
96-450 HB		32-200 HB		16-100 HB		8-50 HB		3,2-20 HB	

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

30 шкал

ГОСТ 9012-59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.

ISO 6506-1:2005: Metallic materials - Brinell hardness test - Part 1: test method.

ASTM E10 - 10 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.

Определение твердости по Бринеллю согласно ДСТУ ISO 6506-1:2007



Диаметр шарика, мм	Сталь, Ni-, Ti-сплавы	Чугун		Медь и сплавы меди			Легкие металлы и их сплавы					Свинец, олово	
		HBW<140	HBW≥140	HBW<35	HBW от 35 до 200	HBW>200	HBW<35	HBW от 35 до 80	HBW от 35 до 80	HBW>80	HBW>80		
		F=30 D ²	F=10 D ²	F=30 D ²	F= 5 D ²	F=10 D ²	F=30 D ²	F=2,5 D ²	F=5 D ²	F=10 D ²	F=15 D ²		F=10 D ²
1	294,2	98,07	294,2	49,03	98,07	294,2	24,52	49,03	98,07		98,07		9,807
2,5	1839	612,9	1839	306,5	612,9	1839	153,2	306,5	612,9		612,9		61,29
5	7355	2452	7355	1226	2452	7355	612,9	1226	2452		2452		245,2
10	29420	9807	29420	4903	9807	29420	2452	4903	9807	14710	9807	14710	980,7

Новое обозначение твердости по Бринеллю согласно с ДСТУ ISO 6506-1:2007



Сл.тел.+38(057)700-38-75;
 М.тел.+38 (096-359-79-46)
 mvi@khadi.kharkov.ua
Мощенок Василий Иванович

Обозначение твердости по Бринеллю

425 HBW 10 / 3000 / 20



Время выдержки, с
(если не равно 10-15 с)

Приложенное усилие, кгс

Диаметр твердосплавного шарика-индентора, мм

Символ твердости по Бринеллю

Число твердости по Бринеллю, кгс/мм²

Твёрдость по Бринеллю

Международный стандарт ISO 6506–1 указывает на **несколько другие группы металлов и сплавов при выборе шкалы твердости:**

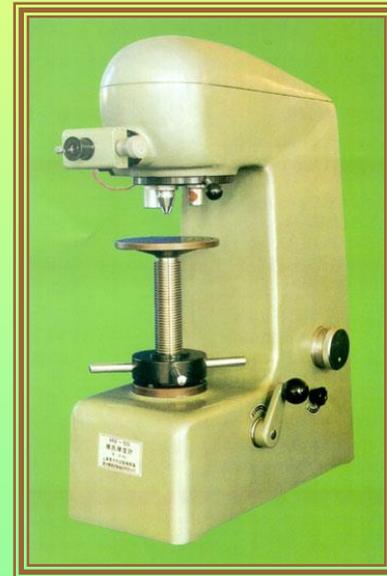
- сталь, никелевые и титановые сплавы;
- чугун;
- медь и медные сплавы;
- легкие металлы и их сплавы;
- свинец, олово.

Американский стандарт ASTM E10–10 рекомендует обращать внимание не на группу металлов и сплавов, а на диапазон предполагаемой твердости исследуемого материала.

В зависимости от его твердости следует выбирать соответствующую шкалу, причем для металла одной и той же твердости, например, 100 HBW, можно по стандарту применять шкалы HBW 10/3000; HBW 10/1500; HBW 10/1000; HBW 10/500; HBW 5/750; HBW 5/250; HBW 5/125; HBW 2,5/187,5; HBW 2,5/62,5; HBW 2,5/31,25; HBW 1/30; HBW 1/10; HBW 1/5.

Твердость по Бринеллю

Числа твердости по Бринеллю, определенные по вышеуказанным шкалам, должны иметь примерно одинаковые значения с разбросом $\pm 3\%$ для образцовой меры твердости 2-го порядка. **Достичь же таковых значений точности на указанных образцовых мерах твердости при использовании сферических инденторов разного диаметра и при разных нагрузках весьма проблематично.**



Цифровые твердомеры по методу Бринелля

Твердость по Бринеллю

Обозначение шкалы	Диаметр шарика, мм	Отношение усилия к квадрату диаметра шарика, К	Диапазон твердости исследуемого материала, HBW
HBW10/3000	10	30	95,5–650
HBW10/1500	10	15	47,7–327
HBW10/1000	10	10	31,8–218
HBW10/500	10	5	15,9–109
HBW10/250	10	2,5	7,96–54,5
HBW10/125	10	1,25	3,98–27,2
HBW10/100	10	1	3,18–21,8
HBW5/750	5	30	95,5–650
HBW5/250	5	10	31,8–218
HBW5/125	5	5	15,9–109
HBW5/62,5	5	2,5	7,96–54,5
HBW5/31,25	5	1,25	3,98–27,2
HBW5/25	5	1	3,18–21,8
HBW2,5/187,5	2,5	30	95,5–650
HBW2,5/62,5	2,5	10	31,8–218
HBW2,5/31,25	2,5	5	15,9–109
HBW2,5/15,625	2,5	2,5	7,96–54,5
HBW2,5/7,8125	2,5	1,25	3,98–27,2
HBW2,5/6,25	2,5	1	3,18–21,8
HBW1/30	1	30	95,5–650
HBW1/10	1	10	31,8–218
HBW1/5	1	5	15,9–109
HBW1/2,5	1	2,5	7,96–54,5
HBW1/1,25	1	1,25	3,98–27,2
HBW1/1	1	1	3,18–21,8

Твердость по Бринеллю

Такое многообразие подходов к выбору шкалы твердости, а также их большое количество весьма осложняют оценку твердости по методу Бринелля.

Кроме этого, измеряют только диаметр отпечатка и, приняв за допущение, что форма отпечатка в точности соответствует профилю индентора (что не совсем справедливо), рассчитывают число твердости по Бринеллю.



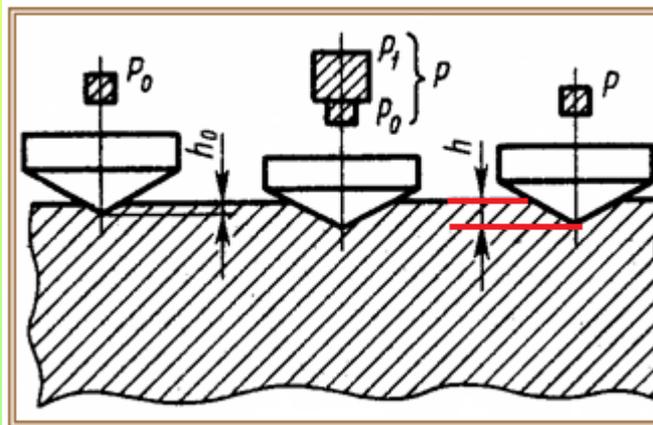
Измерение диаметров отпечатков тоже вызывает определенную проблему, поскольку по краям отпечатка всегда присутствуют навалы и наплывы.

В сущности, этот метод регистрирует не сопротивление металла внедрению индентора, а конечный результат такого сопротивления, когда уже произошло восстановление отпечатка после отвода индентора. Метод Бринелля фиксирует пластическую составляющую в твердости материала. То есть метод хорошо работает только в области больших нагрузок на индентор, а его использование в области микро – и даже нанодиапазоне при измерениях твердости требует дополнительного изучения.

4.2. Твердость по Роквеллу

Метод определения твердости металлов, предложенный американским металлургом С. П. Роквеллом в 1922 г., получил огромное распространение по всему миру и широко используется в настоящее время.

Сущность метода заключается во вдавливании сфероконического или сферического индентора в исследуемую поверхность под действием предварительной и основной нагрузок,



снятии основной нагрузки и определении твердости как относительной глубины внедрения индентора h .

Условия проведения испытаний по Роквеллу, согласно требованиям разных стандартов также, как и по методу Бринелля, весьма многообразны и насчитывают уже 54 шкалы: HRA, HRB, HRBW, HRC, HRD и др.

Твёрдость по Роквеллу

Для измерения твёрдости мягких материалов используют инденторы – шарики (\varnothing : 1,588 / 3,175 / 6,35 / 12,7 мм), твёрдых – алмазный конус.



Наконечник алмазный
для измерения твёрдости
по Роквеллу



Шарики твердосплавные для
измерения твёрдости по
Роквеллу \varnothing : 1,588 / 3,175 / 6,35
/ 12,7 мм

Твердость по Роквеллу

Основные из регламентированных различными национальными и международными стандартами шкалы определения твердости по Роквеллу и условия проведения испытаний для стальных шариков и алмазных конусов приведены в таблице.

№ п/п	Обозначение шкалы	Условия испытаний			Применение шкалы в национальных и международных стандартах		
		тип индентора	предварительная нагрузка, Н	общая нагрузка, Н	ГОСТ 9013–59, 22975–78 (Украина) [97, 98]	ASTM E18–08b (США) [99]	ISO 6508–1 (международный) [100]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	HRA	алмазный конус	98,07	588,4	*	*	*
2	HRB	стальной шарик 1,588 мм	98,07	980,7	*	*	*
3	HRC	алмазный конус	98,07	1471	*	*	*
4	HRD	алмазный конус	98,07	980,7	*	*	*
5	HRE	стальной шарик 3,175 мм	98,07	980,7	*	*	*
6	HRF	стальной шарик 1,588 мм	98,07	588,4	*	*	*
7	HRG	стальной шарик 1,588 мм	98,07	1471	*	*	*
8	HRH	стальной шарик 3,175 мм	98,07	588,4	*	*	*
9	HRK	стальной шарик 3,175 мм	98,07	1471	*	*	*
10	HR15N	алмазный конус	29,42	147,1	*	*	*
11	HR30N	алмазный конус	29,42	294,2	*	*	*
12	HR45N	алмазный конус	29,42	441,3	*	*	*
13	HR15T	стальной шарик 1,588 мм	29,42	147,1	*	*	*
14	HR30T	стальной шарик 1,588 мм	29,42	294,2	*	*	*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО МЕТОДУ РОКВЕЛЛА



$$HRC = 100 - \frac{(h_{\max} - h)}{C}$$

HRA	конус
HRB	шарик 1,588 мм
HRC	конус
HRD	конус
HRE	шарик 3,175 мм
HRF	шарик 1,588 мм
HRG	шарик 1,588 мм
HRH	шарик 3,175 мм
HRK	шарик 3,175 мм
HR15N	конус
HR30N	конус
HR45N	конус
HR15T	шарик 1,588 мм
HR30T	шарик 1,588 мм
HR45T	шарик 1,588 мм
HRL	шарик 6,35 мм
HRM	шарик 6,35 мм
HRP	шарик 6,35 мм
HRR	шарик 12,7 мм
HRS	шарик 12,7 мм
HRV	шарик 12,7 мм
HR15W	шарик 3,175 мм
HR30W	шарик 3,175 мм
HR45W	шарик 3,175 мм
HR15X	шарик 6,35 мм
HR30X	шарик 6,35 мм
HR45X	шарик 6,35 мм
HR15Y	шарик 12,7 мм
HR30Y	шарик 12,7 мм
HR45Y	шарик 12,7 мм

30 шкал

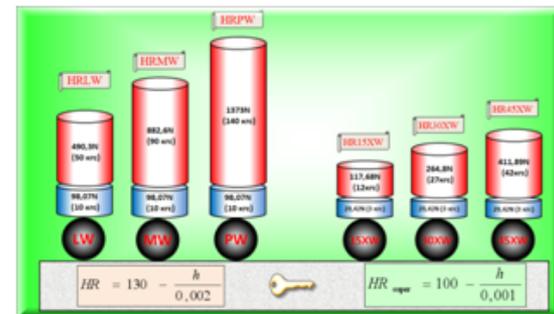
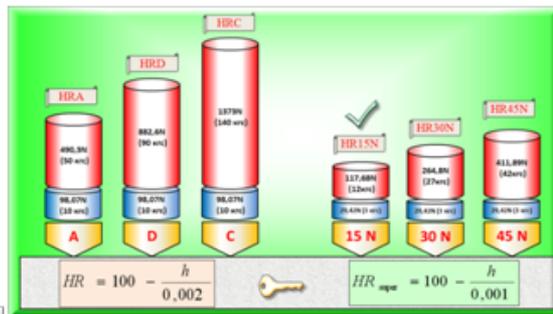
ГОСТ 9013-59 Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.

ГОСТ 22975-78 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу).

ISO 6508-1:2005 Metallic materials - Rockwell hardness test - Part 1: Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).

ASTM E18 - 08b Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.

Определение твердости по Роквеллу согласно ISO 6508-1:2005; ASTM E18-08a



Шкала	Индентор	F ₀ ,N	F ₁ ,N	F,N	Шкала	Индентор	F ₀ ,N	F ₁ ,N	F,N	Шкала	Индентор	F ₀ ,N	F ₁ ,N	F,N
HRA	Конус алм	98,07	490,35	588,42	HRLW	Ø6,35тв	98,07	490,35	588,42	HRHS	Ø3,175ст	98,07	490,35	588,42
HRD	Конус алм	98,07	882,6	980,7	HRMW	Ø6,35тв	98,07	882,6	980,70	HRES	Ø3,175ст	98,07	882,6	980,70
HRC	Конус алм	98,07	1373	1471,07	HRPW	Ø6,35тв	98,07	1373	1471,07	HRKS	Ø3,175ст	98,07	1373	1471,07
HR15N	Конус алм	29,42	117,68	147,1	HR15XW	Ø6,35тв	29,42	117,68	147,10	HR15WS	Ø3,175ст	29,42	117,68	147,10
HR30N	Конус алм	29,42	264,8	294,22	HR30XW	Ø6,35тв	29,42	264,8	294,22	HR30WS	Ø3,175ст	29,42	264,8	294,22
HR45N	Конус алм	29,42	411,89	441,31	HR45XW	Ø6,35тв	29,42	411,89	441,31	HR45WS	Ø3,175ст	29,42	411,89	441,31
HRFW	Ø1,588тв	98,07	490,35	588,42	HRRW	Ø12,7тв	98,07	490,35	588,42	HRLS	Ø6,35ст	98,07	490,35	588,42
HRBW	Ø1,588тв	98,07	882,6	980,7	HRSW	Ø12,7тв	98,07	882,6	980,70	HRMS	Ø6,35ст	98,07	882,6	980,70
HRGW	Ø1,588тв	98,07	1373	1471,07	HRVW	Ø12,7тв	98,07	1373	1471,07	HRPS	Ø6,35ст	98,07	1373	1471,07
HR15TW	Ø1,588тв	29,42	117,68	147,1	HR15YW	Ø12,7тв	29,42	117,68	147,10	HR15XS	Ø6,35ст	29,42	117,68	147,10
HR30TW	Ø1,588тв	29,42	264,8	294,22	HR30YW	Ø12,7тв	29,42	264,8	294,22	HR30XS	Ø6,35ст	29,42	264,8	294,22
HR45TW	Ø1,588тв	29,42	411,89	441,31	HR45YW	Ø12,7тв	29,42	411,89	441,31	HR45XS	Ø6,35ст	29,42	411,89	441,31
HRHW	Ø3,175тв	98,07	490,35	588,42	HRFS	Ø1,588ст	98,07	490,35	588,42	HRRS	Ø12,7ст	98,07	490,35	588,42
HREW	Ø3,175тв	98,07	882,6	980,7	HRBS	Ø1,588ст	98,07	882,6	980,70	HRSS	Ø12,7ст	98,07	882,6	980,70
HRKW	Ø3,175тв	98,07	1373	1471,07	HRGS	Ø1,588ст	98,07	1373	1471,07	HRVS	Ø12,7ст	98,07	1373	1471,07
HR15WW	Ø3,175тв	29,42	117,68	147,1	HR15TS	Ø1,588ст	29,42	117,68	147,10	HR15YS	Ø12,7ст	29,42	117,68	147,10
HR30WW	Ø3,175тв	29,42	264,8	294,22	HR30TS	Ø1,588ст	29,42	264,8	294,22	HR30YS	Ø12,7ст	29,42	264,8	294,22
HR45WW	Ø3,175тв	29,42	411,89	441,31	HR45TS	Ø1,588ст	29,42	411,89	441,31	HR45YS	Ø12,7ст	29,42	411,89	441,31

Новое
обозначение твердости по
Роквеллу согласно с
(ISO 6508-1:2005; ASTM E18-08a)



Сл.тел.+38(057)700-38-75;
М.тел.+38 (096-359-79-46)
mvi@khadi.kharkov.ua
Мощенок
Василий Иванович

Обозначение твердости по Роквеллу

55

HR

30T

W



Материал индентора:

W – шарик из твердого сплава;

S – шарик из стали;

пусто – алмазный конус

Шкала твердости по Роквеллу

1,588

Символ твердости по Роквеллу

Число твердости по Роквеллу

Твёрдость по Роквеллу

Метод Роквелла имеет также существенные **недостатки**:

1) фактически метод не соответствует сути определения понятия «твёрдость», т.е. способности материала сопротивляться внедрению индентора, а показывает конечный результат сопротивления после снятия основной нагрузки;

2) число твердости измеряют в условных единицах и не соответствует размерности чисел твердости, получаемых другими методами;

3) применяются две базы для отсчета чисел твердости: первая после предварительной нагрузки, вторая после основной нагрузки, что не позволяет по полученным значениям рассчитать глубину отпечатка (или глубину внедренной в материал части индентора);

4) числа твердости по методу Роквелла лишены всякого физического смысла.



**Цифровой
твердомер по
методу Роквелла**

4.3. Твёрдость по Виккерсу

Предложенный Р. Смиттом и Д. Сандландом в 1925 г. метод определения твердости по Виккерсу не претерпел существенных принципиальных изменений до настоящего времени, за исключением величины прилагаемого усилия к индентору, регламентируемого следующими стандартами: ISO 14577, ДСТУ ISO 6507, ASTM E384–10e2, ISO 6507–1 48 65.

Диапазоны измерения твердости любым методом, в том числе и по Виккерсу регламентированы международным стандартом ISO 14577, согласно которому при определении твердости по Виккерсу можно применять нагрузку от 2 до 30000 Н (макродиапазон), и до 2 Н (микродиапазон).

В других стандартах заданы другие условия измерения твердости.

Несоответствие условий испытаний в нормативных документах вызывает определенную путаницу и сложность в сопоставлении полученных результатов.

Твёрдость по Виккерсу

Не менее запутанной является и система условных обозначений шкал твердости по Виккерсу, соответствующих вышеуказанным диапазонам приложения усилий к образцу.

В последнее десятилетие выявлена сильная зависимость твёрдости от нагрузки в микродиапазоне, которая вносит сложные ограничения на применение этого метода.

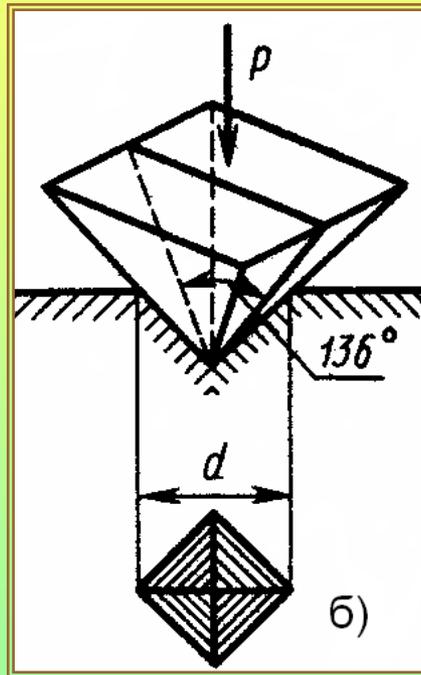
Использование метода определения твердости по Виккерсу нашло практическое применение только в макро- и микродиапазонах, а вот в нанодиапазоне применение пирамиды Виккерса почти не используется, поскольку существует проблема заточки индентора, не позволяющая свести все четыре грани пирамиды Виккерса в одну точку.

Эту проблему удалось легко решить, применив для нанодиапазона трехгранную пирамиду Берковича. Но при этом возникла следующая проблема – у пирамиды Берковича вершина не идеально острая, а имеет закругление неопределенной геометрической формы.

Твёрдость по Виккерсу

Сущность метода заключается во вдавливании в испытуемый материал правильной четырёхгранной алмазной пирамиды с углом 136° между противоположными гранями.

Твёрдость по Виккерсу вычисляется путём деления нагрузки P на площадь поверхности полученного пирамидального отпечатка.



Метод Виккерса позволяет определять твёрдость азотированных и цементированных поверхностей, а также тонких листовых материалов.

Наблюдается хорошее совпадение значений твёрдости по Виккерсу и Бринеллю в пределах от 100 до 450 HV. Твёрдость по Виккерсу во всех случаях обозначается буквами HV без указания размерности — МПа ($\text{кгс}/\text{мм}^2$).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО МЕТОДУ ВИККЕРСА



Твердомер Виккерса



$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

HV 0,001	0,0098
HV 0,002	0,0196
HV 0,005	0,049
HV 0,01	0,0981
HV 0,02	0,1962
HV 0,05	0,4905
HV 0,1	0,981
HV 0,2	1,962
HV 0,3	2,943
HV 0,5	4,905
HV	от 9,807 до 1176,68 Н (макродиапазон)
HV	от $9,807 \times 10^{-3}$ до 9,807 Н (микродиапазон)
HV 0,015	0,147
HV 0,025	0,245
HV 1	9,807
HV 2	19,61
HV 3	29,42
HV 5	49,03
HV 10	98,07
HV 20	196,1
HV 30	294,2
HV 50	490,3
HV 100	980,7

>21 шкал

ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

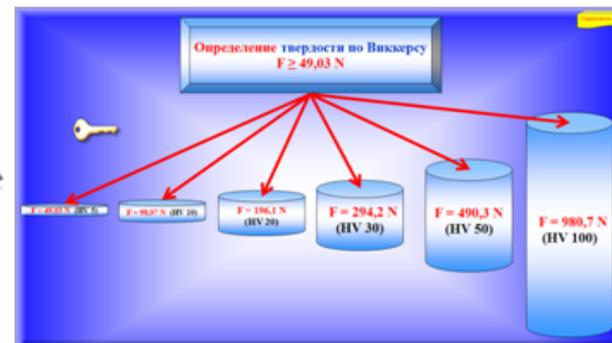
ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.

ISO 6507-1:2005 Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method.

ASTM E384 - 10e2 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials.

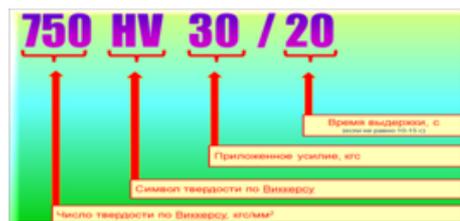
Определение твердости по Виккерсу согласно ДСТУ ISO 6507-1:2007

Выбор диапазона измерения твердости по Виккерсу:



Твердость по Виккерсу (F ≥ 49,03 N)		Твердость по Виккерсу при малых нагрузках (1,961 N ≤ F < 49,03 N)		Микротвердость по Виккерсу (0,098 N ≤ F < 1,961 N)	
Символ твердости	Значение F, N	Символ твердости	Значение F, N	Символ твердости	Значение F, N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

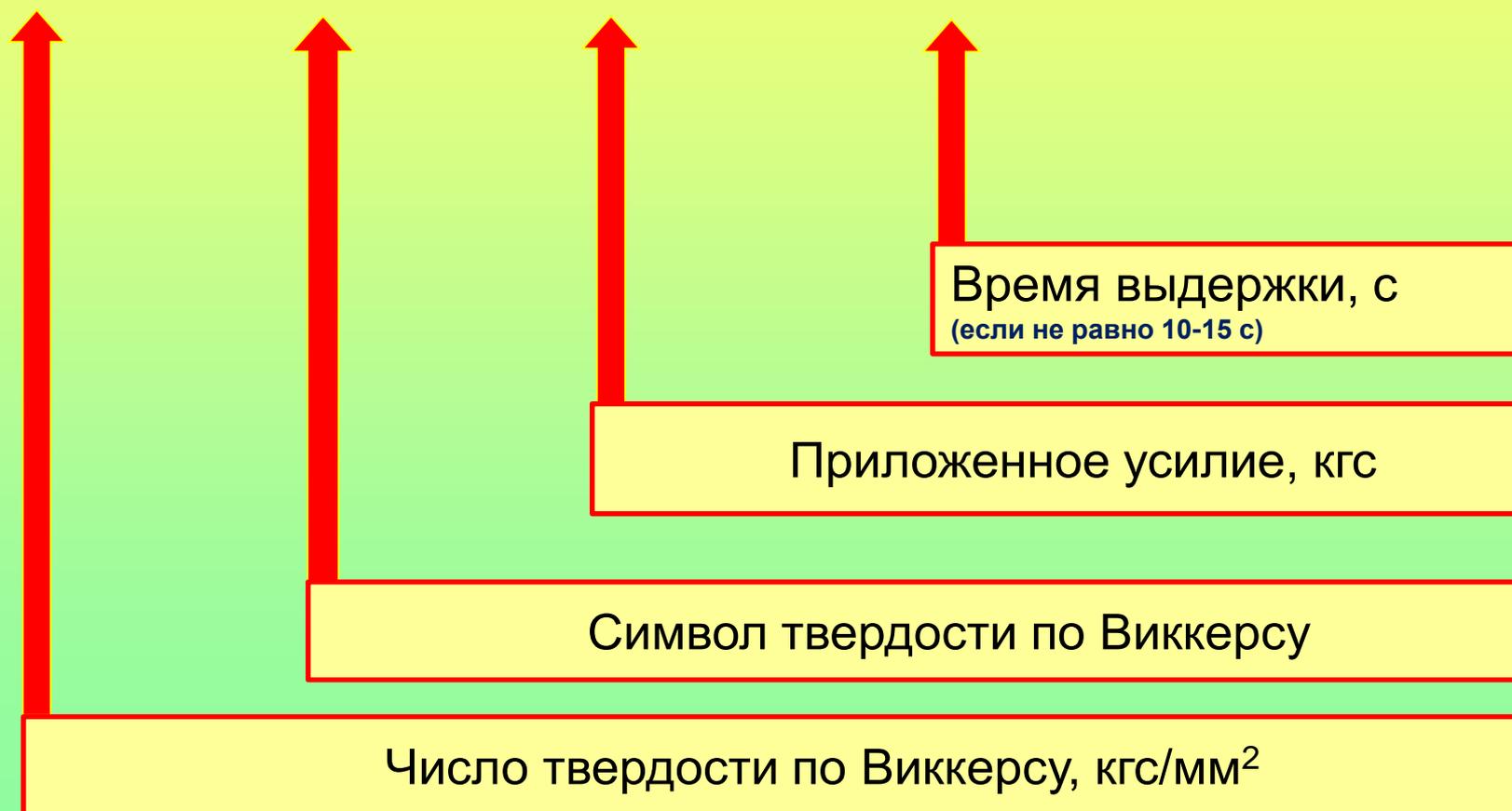
Новое обозначение твердости по Виккерсу согласно ДСТУ ISO 6507-1:2007



Сл.тел.+38(057)700-38-75;
М.тел.+38 (096-359-79-46)
mvi@khadi.kharkov.ua
Мощенок
Василий Иванович

Обозначение твердости по Виккерсу

750 HV 30 / 20



Твердомеры Виккерса



Стационарные твердомеры по Виккерсу HV-10, HV-30 и HV-50

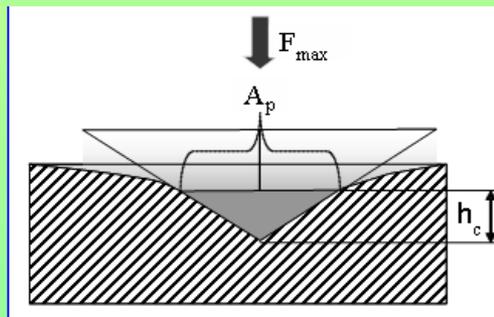


Наконечник алмазный НП для измерения твердости по методу Виккерса

4.4. Твёрдость индентирования

Твёрдость индентирования H_{IT} (ранее в 1960–70 гг. этот метод разрабатывали Г. Н. Калей, А. П. Терновский, М. М. Хрущов, М.Х. Шоршоров, В. П. Алехин, С. И. Булычев и др. и он получил название **кинетической твердости**).

Этот метод является одним из основных методов оценки твердости, отнесенных ко 2-й группе и применяется сейчас, в основном, при исследовании **нанотвердости материалов**.

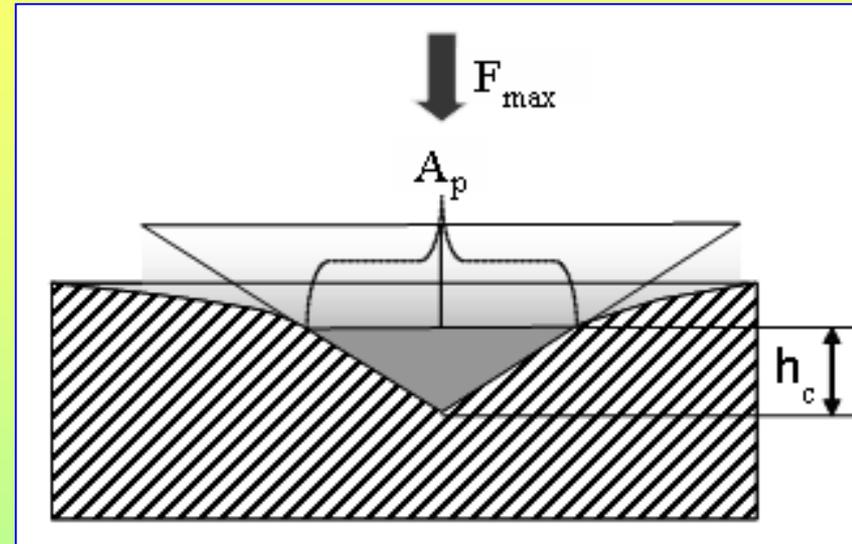
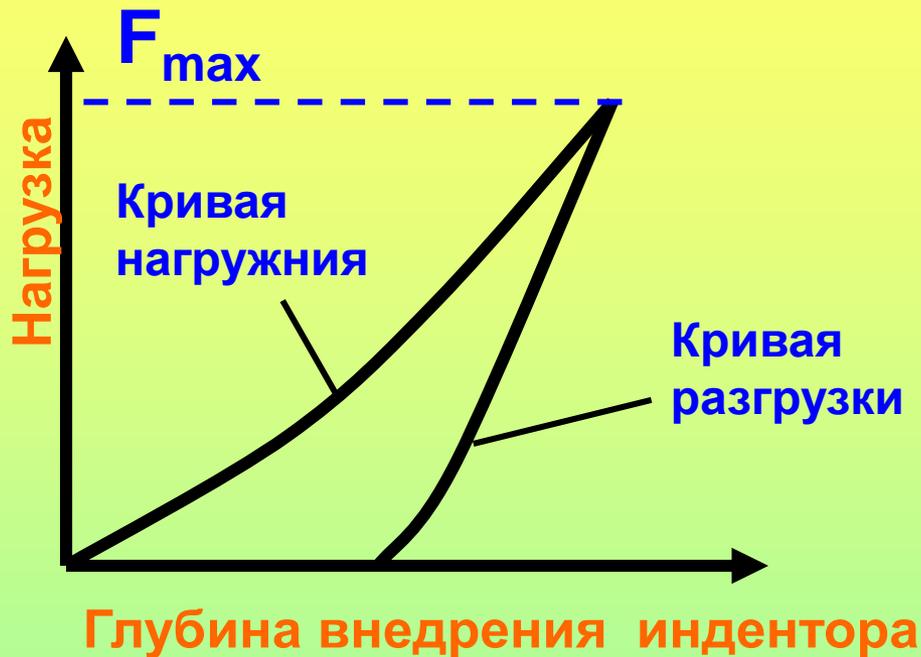


По ISO 14577 твердость индентирования является мерой сопротивления материала внедрению индентора при максимальной нагрузке

и представляет собой **отношение этой нагрузки к площади проекции контакта индентора с исследуемым материалом**.

Твёрдость индентирования

Диаграмма нагружения индентора



$$H = \frac{F_{\max}}{A_p}$$

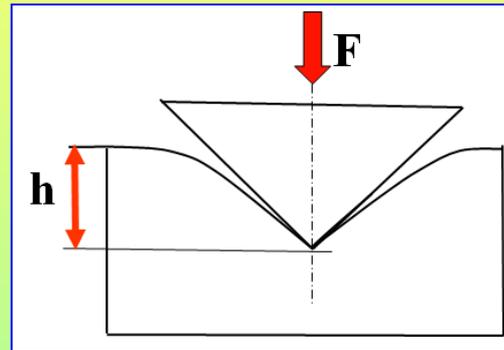
$$A_p = 24,56 \cdot h_c^2$$

где h_c — глубина контакта.

Твёрдость индентирования

Твёрдость индентирования характеризует сопротивление материала внедрению индентора **только в одной точке при максимальной нагрузке**, а не во всем диапазоне процесса внедрения индентора.

Площадь проекции контакта индентора с материалом всегда очень сложно определить, особенно для упругих материалов, например, резины,



т.к. она стремится к нулю, и при этом **теряется физический смысл** определения твердости индентирования.

Более точно и универсально H_{IT} можно было бы оценивать отношением **максимальной нагрузки к проекции сечения внедренной в материал части индентора на основную плоскость**, т.е. плоскость, совпадающую с поверхностью образца. Такой подход позволил бы применять H_{IT} не только для упруго-пластичных и пластичных, но и упругих материалов.

4.5. Метод среднего контактного давления

Для оценки нанотвердости металлов пирамидой Берковича в Институте сверхтвердых материалов им. Бакуля (г. Киев) разработан метод измерения твердости индентирования H_{IT} по среднему контактному давлению (СКД), определяемому не по одной точке при максимальной нагрузке, а по всей ветви кривой в процессе нагружения.

Для получения значений глубины внедрения индентора с учетом прогиба на краю отпечатка предложена формула,

$$h_{(el)i} = h_{(el)\max} \left(\frac{P_i}{P_{\max}} \right)^{1/2}$$



позволяющая вычислить глубину прогиба по периметру контакта индентора с материалом

где $h_{(el)i}$ — текущий упругий прогиб поверхности образца; $h_{(el)\max}$ — упругий прогиб поверхности образца при максимальной нагрузке; P_i — текущее значение нагрузки на индентор; P_{\max} — максимальная нагрузка на индентор.

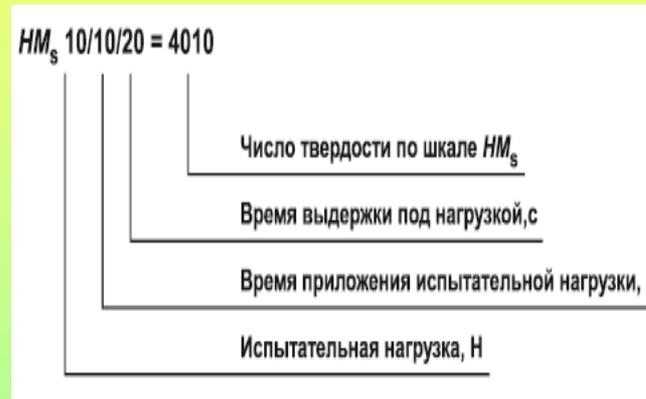
Основное достоинство этого метода в том, что нанотвердость можно определить во всем диапазоне нагружения и оценивается она кривой, а не одной точкой.

4.6. Твёрдость по Мартенсу

Твёрдость по Мартенсу (ранее, до 2002 г., – универсальная твёрдость согласно DIN 50359) представляет собой **отношение силы вдавливания к площади боковой поверхности внедренной в материал части индентора.**

Твёрдость по Мартенсу

регламентирована только для пирамид **Виккерса и Берковича** и, к сожалению, не регламентирована для других форм инденторов, например, сферических и сфероконических.



Из-за несовершенства геометрии пирамид (отклонения от идеальной формы по причине закругления вершин

и линий пересечения граней) наиболее приемлемыми могли бы быть именно сферические и сфероконические инденторы. Их геометрию более точно можно описать эмпирически и не требуется калибровка по эталонным образцам с целью подбора соответствующих коэффициентов.

Твёрдость по Мартенсу

Для пирамиды **Виккерса** твердость по **Мартенсу** будет равна:

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} = \frac{F}{26,43h^2}$$

где F – нагрузка на индентор;
 $A_s(h)$ – площадь боковой
поверхности индентора на
расстоянии h от вершины.

Для пирамиды Берковича
аналогичная твердость
соответствует

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} = \frac{F}{26,44h^2}$$

Согласно ISO 14577, твердость по Мартенсу определяется в конкретных точках нагрузочной части диаграммы индентирования, равных 1 Н; 2,5 Н; 5 Н; 10 Н или кратных 10. Определяется твердость в макро-, микро- и нанодиапазонах, однако применение метода в нанодиапазоне вызывает затруднения из-за несоответствия реальной формы пирамидального индентора идеальной.

Твёрдость по Мартенсу

Эту проблему успешно можно решить, применяя для **нанодиапазона инденторы сферической или сфероконической форм**. Поскольку твердость определяется отношением нагрузки к площади боковой поверхности внедренной части индентора, то отпадает необходимость в учете навалов и прогибов отпечатков.

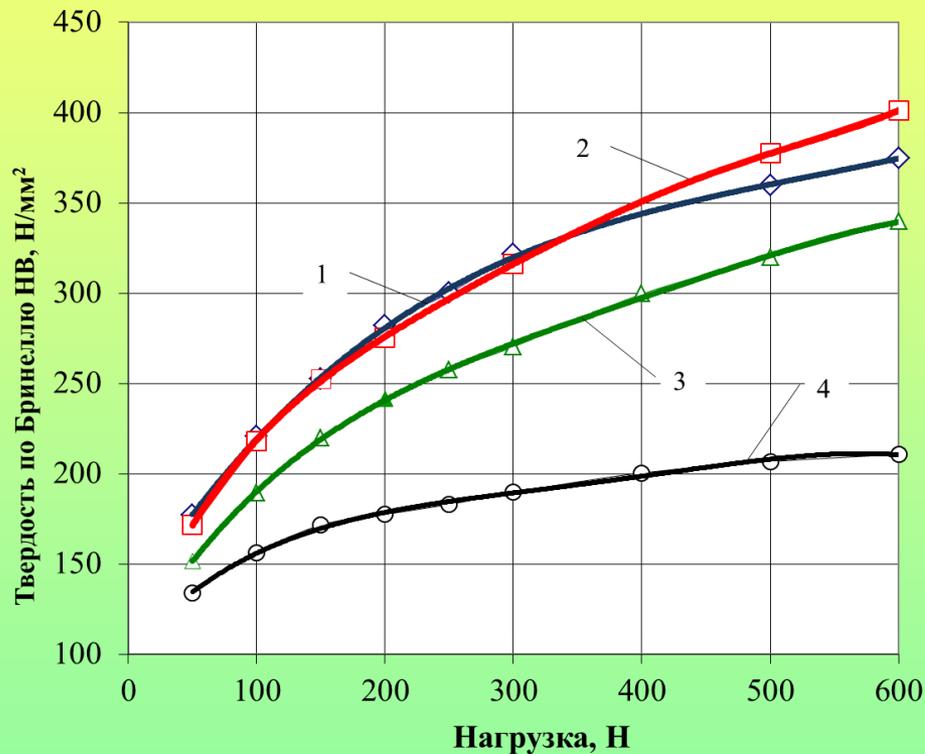
Вышеприведенные обстоятельства, несомненно, ставят этот метод определения твердости в разряд приоритетных и заслуживающих большего внимания исследователей и производителей.

К недостаткам этого метода следует отнести то обстоятельство, что твердость **измеряется не непрерывно в процессе внедрения индентора, а в отдельных фиксированных точках** после выдержки под нагрузкой в течение определенного периода времени.

Данный метод, также как и метод Шора, в **наибольшей степени соответствует классическому определению понятия «твердость»**. Твердость по Мартенсу **учитывает упругую и пластическую деформации при индентировании**, применяется для **исследования металлических и неметаллических материалов, не зависит от параметров отпечатка, почти полностью соответствует классическому определению понятия «твердость»** и, по совокупности вышеприведенных характеристик, может претендовать на один из основных методов оценки этого свойства.

Размерный эффект при определении твёрдости материалов

Анализ результатов измерения твердости материалов различными методами свидетельствует о том, что большинство авторов считает число твердости для данного материала константой, которая не зависит от условий испытания, при которых соблюден принцип геометрического или механического подобия .



Как следует из этого рисунка, значения твердости, полученные по методу невосстановленного отпечатка при вдавливании сферического индентора, резко увеличиваются с увеличением нагрузки, достигая изменения твердости до 240 % у отдельных металлов. Зависимость твердости от нагрузки носит название **Indentation size effect** – **размерный эффект**.

Зависимость твердости от нагрузки при вдавливании сферического индентора:
1 – армко железо; 2 – сталь ШХ15; 3 – латунь ЛС59-1; 4 – сплав Амц

Сопоставление чисел твёрдости

Сопоставление чисел твердости, полученных разными методами, необходимо в тех случаях, когда надо сравнить материалы по твердости, а отсутствует требуемое оборудование или наоборот, оборудование имеется, но размеры исследуемых образцов различны и невозможно их испытать в одинаковых условиях.

Чтобы сравнивать между собой числа твердости, полученные разными методами, необходимо вначале измерить твердость как можно большего числа известных материалов в различных условиях и разными методами.

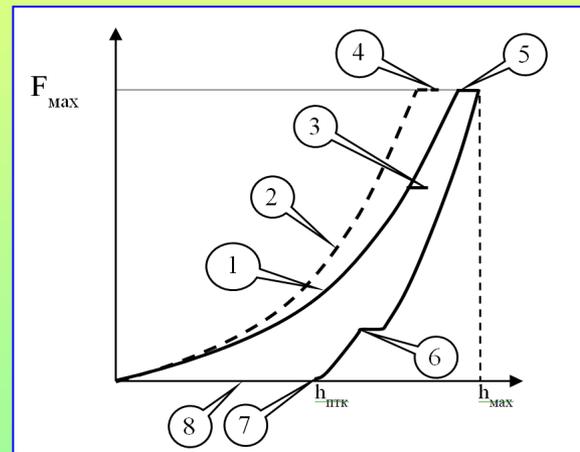
Затем нужно составить переводные таблицы чисел твердости, определенных разными методами. Для вышеприведенных трех методов оценки твердости (Бринелля, Роквелла, Виккерса) только для стандартизованных режимов получится около полутора тысяч сочетаний для перехода от одной шкалы твердости к другой.

Сравнение чисел твердости, полученных различными методами, лишено всякого физического смысла, поскольку сравниваются числа, полученные исключительно эмпирическим путем и имеющие различную размерность.

4.7. Анализ методов оценки твердости материалов с помощью диаграммы индентирования

Для идентификации кинетики процесса индентирования все перечисленные основные методы определения твердости материалов расположим на кривой **$F-h$** . Такая картина позволит наглядно продемонстрировать сущность каждого из обсуждаемых методов.

На нагрузочной ветви **кривой 1** можно поместить **поверхностную 1 и объемную 2 твердость**, а вот вблизи этой кривой с небольшим смещением на



глубину внедрения индентора при выдержке под максимальной нагрузкой – твердость по **Мартенсу (участок 3)**,

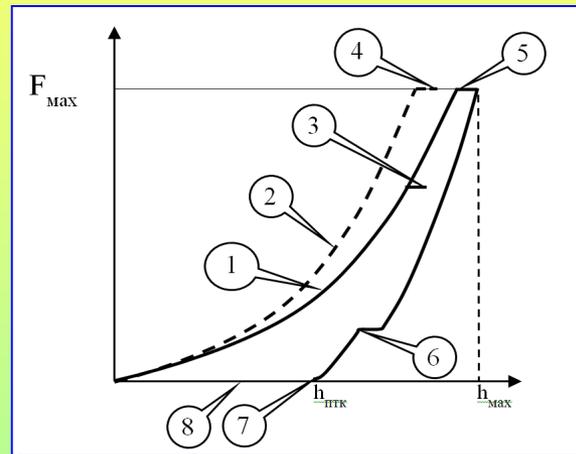
а **твердость по методу СКД** будет определяться на кривой, расположенной несколько выше нагрузочной ветви диаграммы **(участок 2)**.

Анализ методов оценки твердости материалов с помощью диаграммы индентирования

Схема расположения методов определения твердости на реальной (—) и с учетом контакта индентора с материалом (---) диаграммах индентирования:

1 – нагрузочная ветвь диаграммы индентирования, на которой определяют поверхностную, проекционную и объемную твердость материалов;

2 – нагрузочная ветвь диаграммы индентирования с учетом контакта индентора с материалом, на которой определяют твердость по методу СКД;



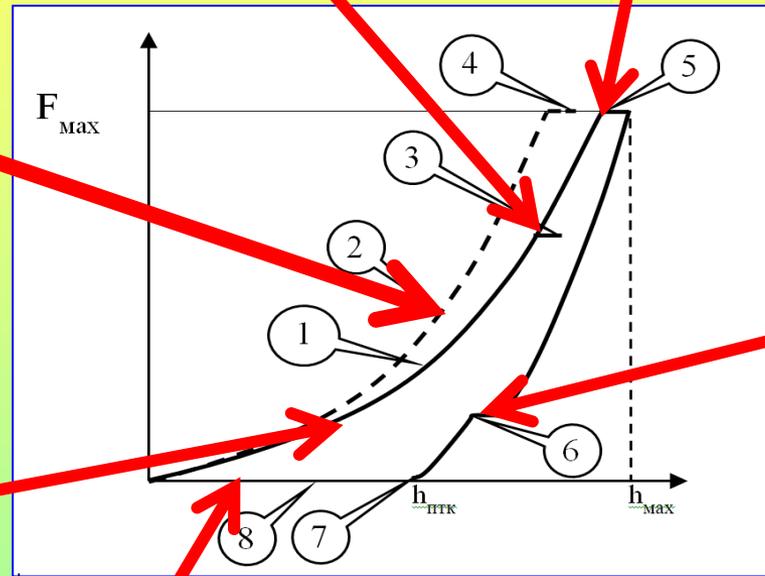
3 – точка на нагрузочной ветви диаграммы индентирования, по которой определяют твердость по Мартенсу (обычно значение этой точки соответствует 1; 2,5; 5; 10 Н или кратным им значениям)

4 – точка на нагрузочной ветви диаграммы индентирования с учетом контакта индентора с материалом, по которой определяют твердость H_{IT} ; **5** – точка на нагрузочной ветви диаграммы индентирования, по которой определяют твердость по Шору или Барколу; **6** – точка на разгрузочной ветви диаграммы индентирования, по которой определяют твердость по Роквеллу (ориентировочно); **7** – точка на разгрузочной ветви диаграммы индентирования, по которой определяют восстановленную твердость по методу последней точки контакта индентора с образцом (метод ПТК); **8** – точка на разгрузочной ветви диаграммы индентирования, по которой определяют твердость по Бринеллю, Виккерсу, Берковичу и др. методам

Метод Шора, Баркола и
твёрдость
индентирования

Твёрдость
по Мартенсу

Твердость по
методу СКД



Твёрдость по
Роквеллу

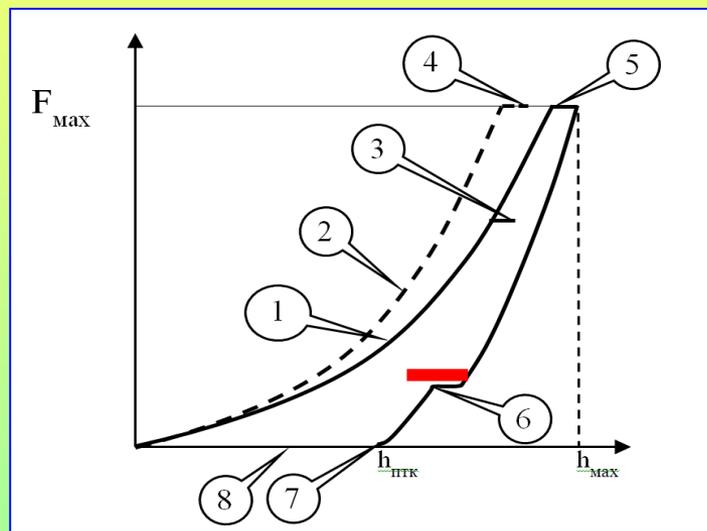
Поверхностная,
проекционная и
объемная
твёрдость

Твёрдость по Бринеллю, Виккерсу,
микротвёрдость

Анализ методов оценки твердости материалов с помощью диаграммы индентирования

На **участке 5** диаграммы после выдержки под максимальной нагрузкой располагаются **метод Шора и метод твердости индентирования**.

На разгрузочной ветви диаграммы, после снятия основной нагрузки, условно можно расположить **метод Роквелла (участок 6)**.



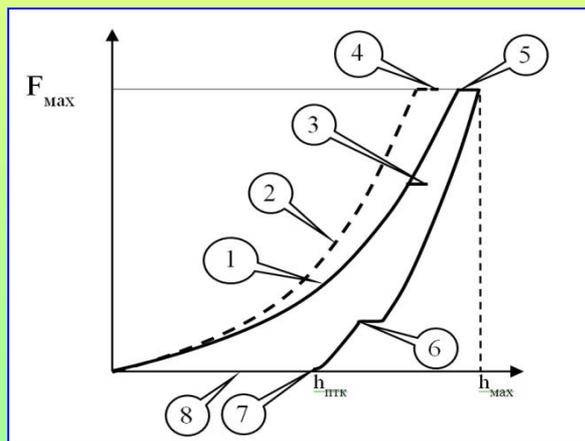
И только после полного снятия нагрузки и отвода индентора от образца через некоторое время определяют твердость по **Бринеллю, Виккерсу и микротвердость (участок 8)**.

Метод оценки твердости по **Мартенсу** охватывает **все диапазоны** (макро-, микро-, нано-) и рекомендован для пирамидальных инденторов Виккерса и Берковича.

Анализ методов оценки твердости материалов с помощью диаграммы индентирования

Методы определения твердости по Роквеллу, Бринеллю, Виккерсу, микротвердости (восстановленная твердость) хотя и являются самыми распространенными, но они, как уже отмечалось, не отвечают сути понятия «твердость», т.е. способности материала сопротивляться внедрению индентора.

Анализируя рис., можно отметить очевидность предположения, что восстановленную твердость (по Бринеллю, Виккерсу, микротвердость)



целесообразно определять не по истечении определенного времени после индентирования (точка 8), а в точке $h_{\text{ПТТК}}$, соответствующей нулевому значению нагрузки на индентор.

В этом случае восстановление параметров отпечатка с течением времени будет минимальным.

Выводы

1. В условиях ужесточения условий работы современной техники особое внимание уделяется определению твердости, как наиболее простому, массовому, неразрушающему способу контроля качества материалов и готовых изделий.

2. Применяемые в настоящее время многочисленные приборы для оценки твердости с различными требованиями к условиям испытаний, использованию разнообразных инденторов, с реализацией разных видов и схем нагружения не позволяют дать точной физической интерпретации этого важного свойства материала

3. **Только методики Шора и Баркола** в некотором допущении позволяют оценивать силу сопротивления материала внедрению индентора.

Выводы

4. Не существует единого научно обоснованного определения понятия «твердость».

5. Наиболее распространенные методы статического индентирования (Роквелл, Бринелль, Виккерс) дают усредненный условный показатель твердости, они оценивают скорее пластичность материалов.

6. Твердость индентирования определяется в одной точке при максимальной нагрузке и требует дополнительного расчета глубины прогиба поверхности образца на краю отпечатка. Определение твердости производится без учета упругой составляющей и не является корректным.

Выводы

7. Важнейший метод оценки твердости, рекомендуемый международным стандартом ISO 14577 и учитывающий упругую и пластическую составляющую в измерениях твердости, – это **метод Мартенса**.

8. Исследования выявили, что твёрдость не является константой, а зависит от нагрузки, то есть имеет место размерный эффект.

9. Твердость численно равна отношению нагрузки к размеру отпечатка (метод восстановленного отпечатка) и твердость численно равна отношению нагрузки на индентор к размеру внедренной в материал его части (метод невосстановленного отпечатка).

Выводы

10. Важной проблемой является устранение существующего противоречия между общепринятым определением твердости и методами ее определения и создание новой методологии определения твердости, как способности материала сопротивляться внедрению индентора во всем диапазоне нагружения, единого подхода к ее измерению в макро-, микро- и нанодиапазонах, дающего возможность сравнивать числа твердости, полученные разными методами, а также прогнозировать характер изменения твердости в зависимости от условий испытаний.

Задания для самостоятельной работы

1. В чём недостатки метода определения твёрдости Бринелля?

2. В чём недостатки метода определения твёрдости Роквелла?

3. В чём недостатки и преимущества метода Виккерса?

4. Сущность твёрдости индентирования.

5. Сущность твёрдости по Мартенсу.



Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталиа Алексеевна

E-mail: lalaz1991@mail.ru

г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М

Tel.(8-057)707-37-92

