

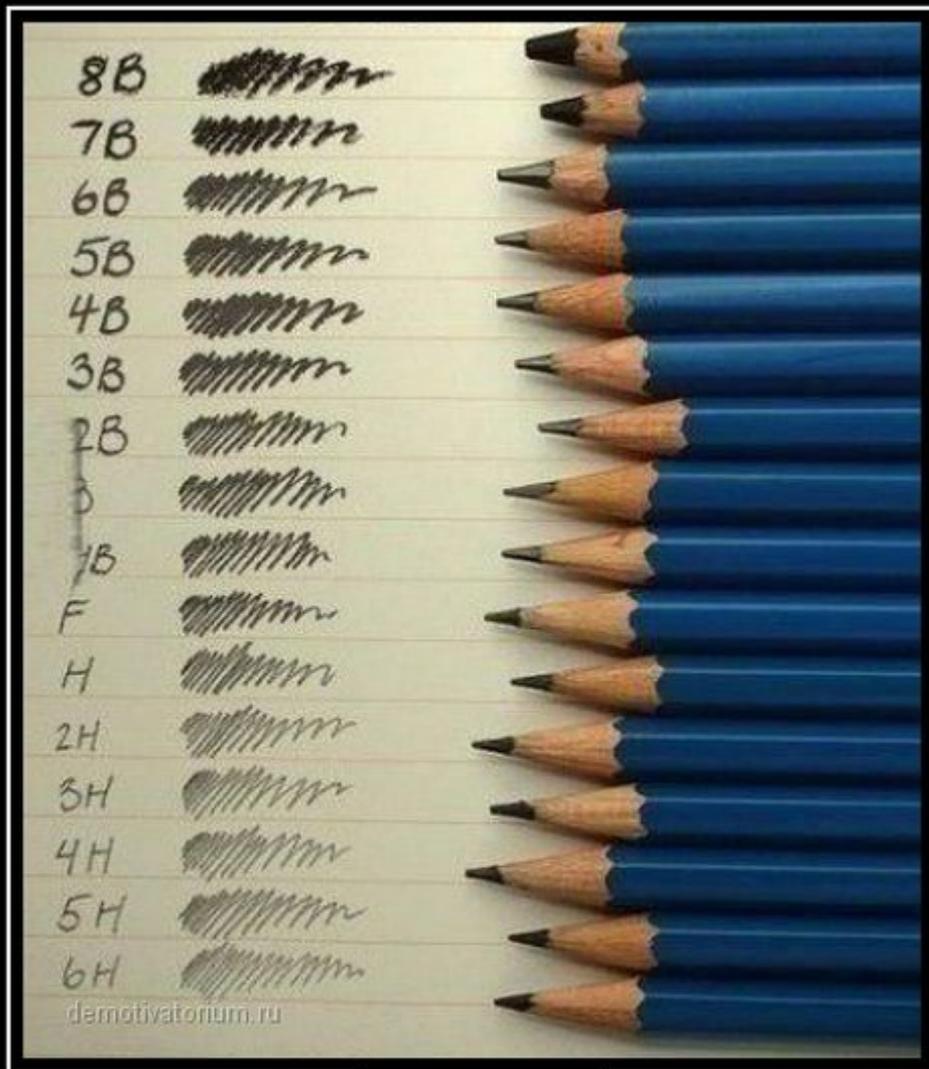
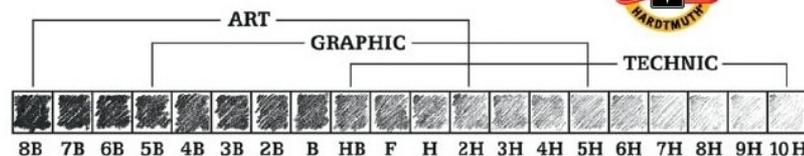
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

МОДУЛЬ 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Лекция 14.

Анализ твердости материалов. Методы измерения твердости. Твердость по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу. Измерение микротвердости. Физические основы микротвердости. Структурные и кинетические особенности формирования формоизменения материалов при вдавливании. Установка для микромеханических исследований по методу вдавливания. Вычисления твердости по результатам испытания на микротвердость.

Карандаши для черчения “KOH-I-NOOR”.



Чертежные карандаши имеют различную твердость грифеля:
твердые - Т, 2Т, 3Т;
мягкие - М, 2М, 3М;
средней твердости - ТМ.

Для импортных карандашей твердость маркируется следующим образом:
твердые – Н
мягкие – В
средней твердости – НВ, F

Под **твердостью** понимают способность поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформациям или разрушению при внедрении в него другого, более твердого тела (индентора).

Твёрдость — свойство материала не испытывать пластической деформации при внедрении в материал более твёрдого тела — индентора).



Относительная твердость некоторых металлов	
Алмаз-эталон	10
Хром	9
Вольфрам	7
Никель	5
Платина	4,3
Железо	4
Медь	3
Алюминий	2,9
Серебро	2,7
Цинк	2,5
Золото	2,5
Кальций	2,2
Магний	2,1
Олово	1,8
Свинец	1,5
Калий	0,5
Натрий	0,4

Твёрдость определяется как отношение величины нагрузки к площади поверхности, площади проекции или объёму отпечатка.

Твёрдость измеряют в трёх диапазонах: макро, микро, нано.

- Макродиапазон (**твёрдость**) регламентирует величину нагрузки на индентор от 2 Н до 30 кН.

(1 ньютон = 0.1019716212978 килограмм-сила)

- Микродиапазон (**микротвёрдость**) регламентирует величину нагрузки на индентор до 2 Н и глубину внедрения индентора больше 0,2 мкм.

- Нанодиапазон (**нанотвёрдость**) регламентирует только глубину внедрения индентора, которая должна быть меньше 0,2 мкм.

Методы измерения твёрдости

Методы определения твёрдости делятся по способу приложения нагрузки

```
graph TD; A[Методы определения твёрдости делятся по способу приложения нагрузки] --> B[статические]; A --> C[динамические (ударные)];
```

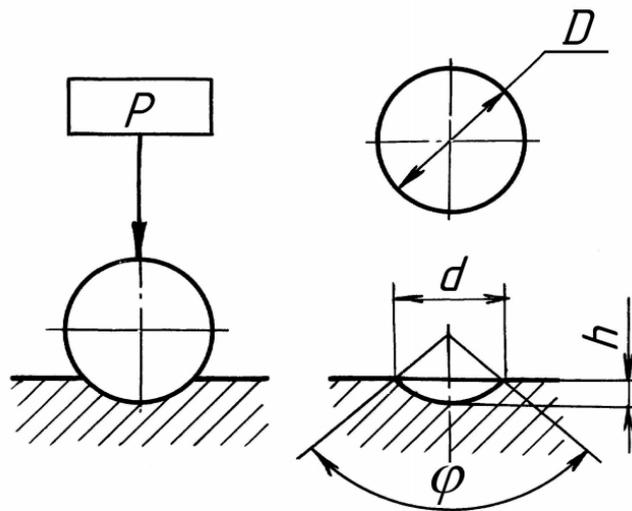
статические

динамические (ударные)

Метод Бринелля

Твёрдость определяется по диаметру отпечатка, оставляемому металлическим **шариком**, вдавливаемым в поверхность.

Твёрдость вычисляется как **отношение усилия**, приложенного к шарикю, к **площади** отпечатка,
(причём площадь отпечатка берётся как площадь части сферы, а не как площадь круга).



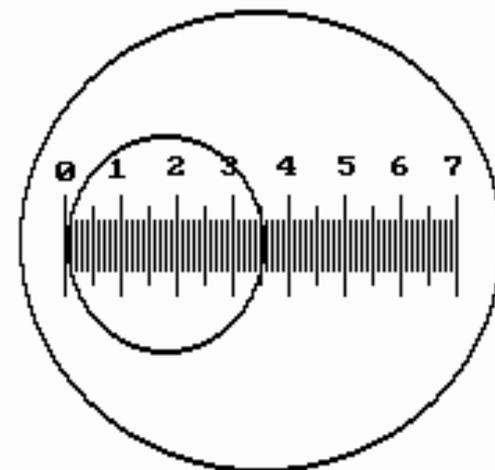
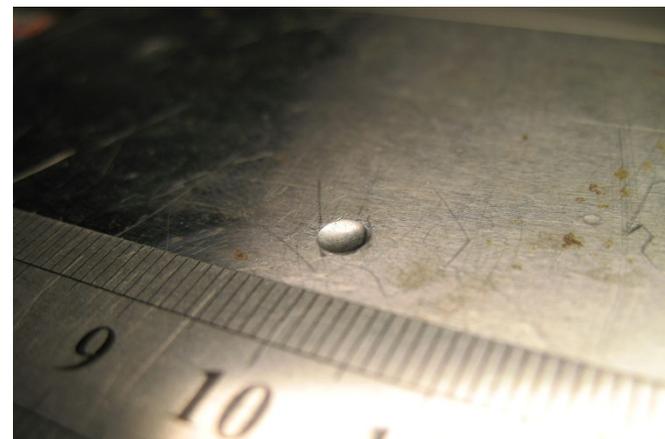
Испытание проводится следующим образом:

1. вначале образец подводят к индентору;
2. затем вдавливают индентор в образец с плавно нарастающей нагрузкой в течение 2-8 секунд;
3. после достижения максимальной величины, нагрузка на индентор выдерживается в определённом интервале времени (для сталей, обычно, 10-15 секунд);
4. Затем снимают приложенную нагрузку, отводят образец от индентора и измеряют диаметр получившегося отпечатка.

В качестве инденторов используются шарики из твёрдого сплава диаметром **1; 2; 2.5; 5** и **10 мм**.

Величину нагрузки и диаметр шарика выбирают в зависимости от исследуемого материала:

- чтобы толщина образца, как минимум, в 8 раз превышала глубину вдавливания индентора.
- чтобы диаметр отпечатка находился в пределах от $0.24 \cdot D$ до $0.6 \cdot D$, где D — диаметр индентора (шарика).



Твёрдость по Бринеллю может рассчитываться двумя методами:

- метод восстановленного отпечатка;
- метод невосстановленного отпечатка.

По методу **восстановленного отпечатка** твёрдость рассчитывается как отношение приложенной нагрузки к площади поверхности отпечатка:

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

где:

- P — приложенная нагрузка, Н;
- D — диаметр шарика, мм;
- d — диаметр отпечатка, мм.

По методу **невосстановленного отпечатка** твёрдость определяется как отношение приложенной нагрузки к площади внедрённой в материал части индентора:

$$HB = \frac{P}{\pi Dh}$$

где: h — глубина внедрения индентора

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} 10^{-6}, \text{ МПа},$$

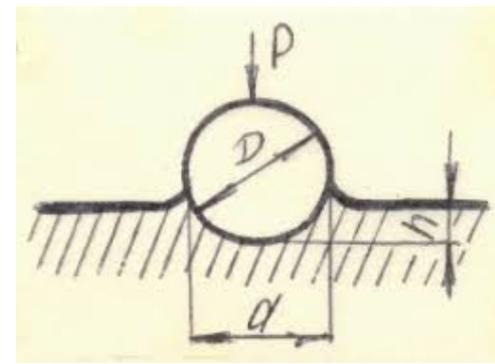
Размерность единиц твердости по Бринеллю МПа (кгс/мм²).

Число твердости по Бринеллю записывают без единиц измерения.

Твёрдость по Бринеллю обозначается **HB**, где Н — hardness (твёрдость), В — Бринелль;

Материал	Твёрдость
<u>Алюминий</u>	15 HB
<u>Медь</u>	35 HB
<u>Дюраль</u>	70 HB
Мягкая <u>сталь</u>	120 HB
<u>Нержавеющая сталь</u>	250 HB
<u>Стекло</u>	500 HB
<u>Инструментальная сталь</u>	650—700 HB

Недостатки метода Бринелля



- Твёрдость по Бринеллю зависит от нагрузки.
- При вдавливании индентора по краям отпечатка из-за выдавливания материала образуются навалы и наплывы, что затрудняет измерение как диаметра, так и глубины отпечатка.
- Из-за большого размера тела внедрения (шарика) метод неприменим для тонких образцов.

Диаметр шарика и нагрузку следует выбирать так, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах $0,25D < d < 0,6D$.

по Бринеллю нельзя определять твёрдость очень мягких ($HB < 8$) и очень твёрдых материалов ($HB > 450$).

В мягких материалах шарик погрузится очень глубоко, диаметр отпечатка будет близок к диаметру шарика D и перестанет служить критерием твёрдости.

Наоборот, если твёрдость материала будет очень большой, величина отпечатка получится маленькой и края его будут столь нечёткими, что не удастся точно измерить диаметр отпечатка, к тому же шарик может получить остаточную деформацию, искажающую результаты испытания.

Достоинства метода Бринелля

Зная твёрдость по Бринеллю, можно быстро найти предел прочности и текучести материала, что важно для прикладных инженерных задач:

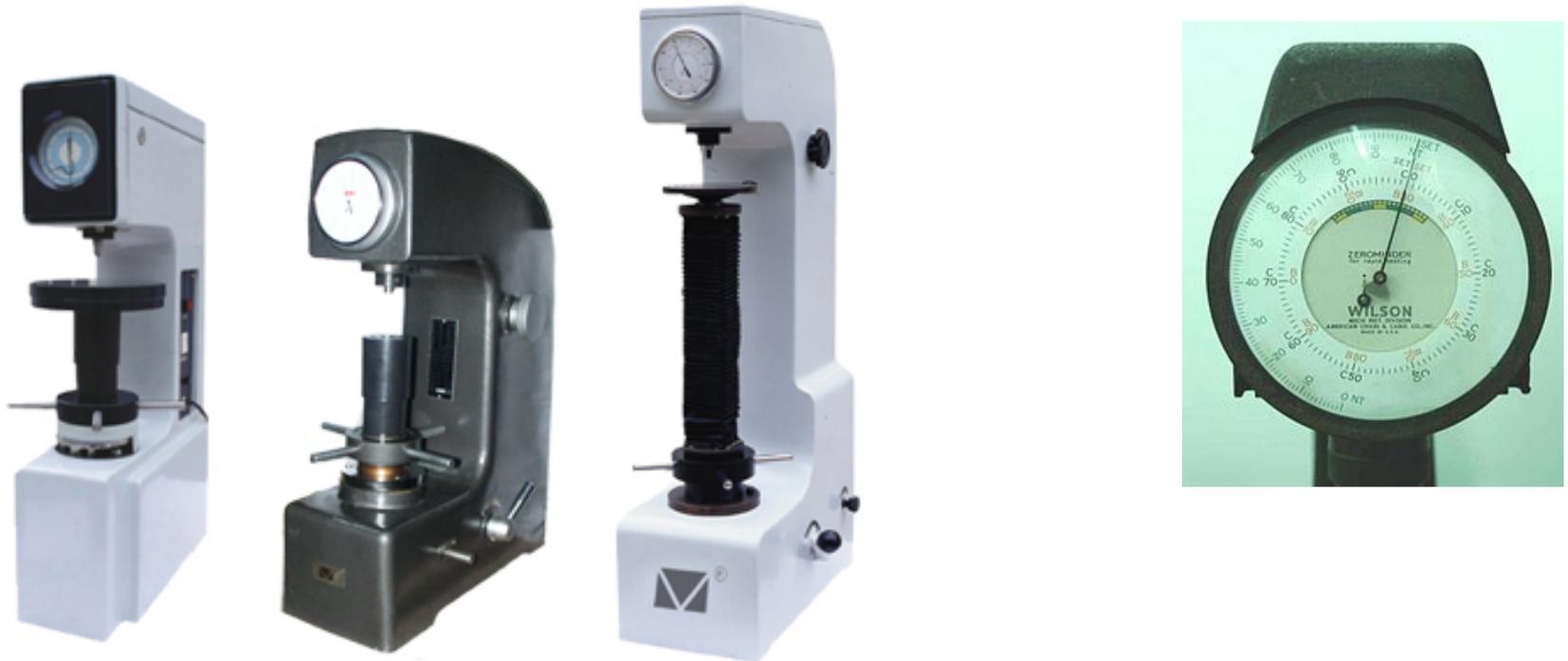
$$\sigma_B = \frac{HB}{3} \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \frac{10HB}{3} [MPa]$$

Данный метод является более точным по сравнению с [методом Роквелла](#) на более низких значениях твёрдости (ниже 30 HRC).

Также метод Бринелля менее критичен к чистоте поверхности, подготовленной под замер твёрдости.

Метод Роквелла

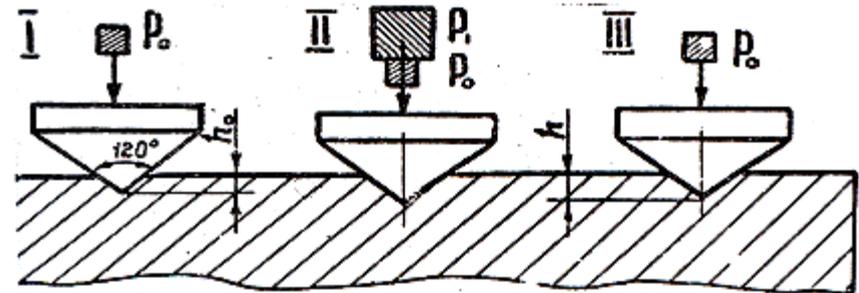
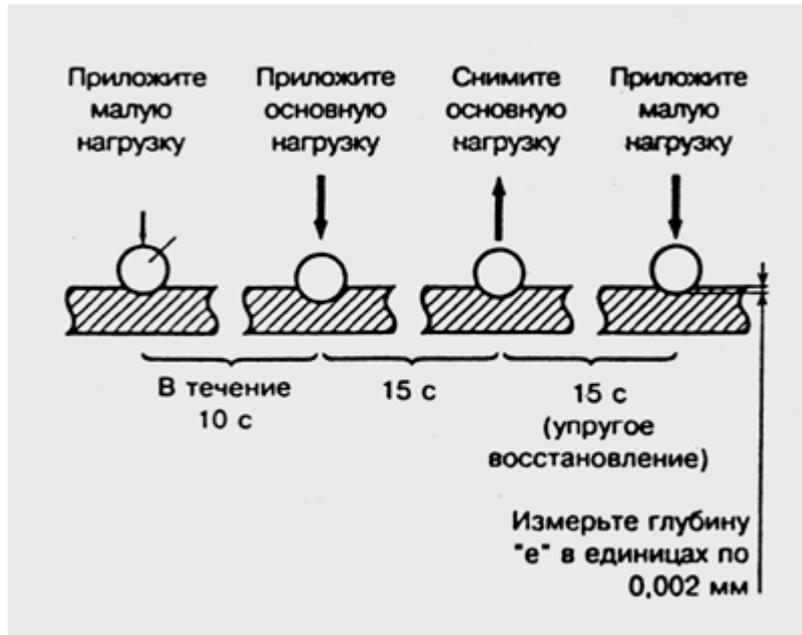
Сущность метода заключается во **вдавливании** наконечника с алмазным конусом или со стальным шариком в испытуемый образец под действием последовательно прилагаемых предварительной (P0) и основной (P1) нагрузок и в **измерении остаточной глубины проникновения** этого наконечника после снятия основной нагрузки.



При измерении твёрдости по Роквеллу применяют два типа стандартных наконечников:

а) для материалов небольшой (средней) твёрдости – **стальной шарик** диаметром 1,588 мм (1/16 дюйма);

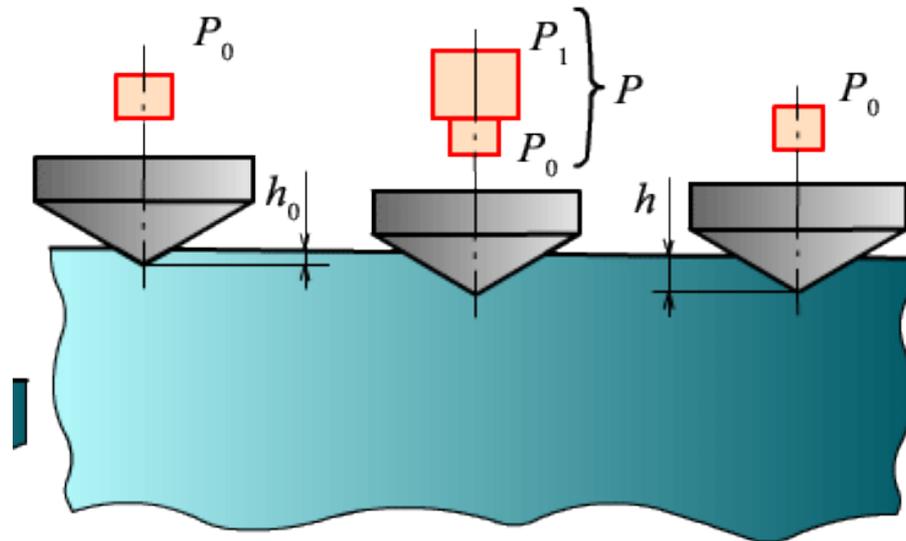
б) для материалов с высокой твёрдостью (с твёрдостью по Бринеллю $HV > 230$) – **алмазный наконечник**, представляющий собой конус с углом $\alpha = 120^\circ$ и радиусом закругления при вершине $R = 0,2$ мм.



При испытании по Роквеллу сначала прикладывается малая (предварительная нагрузка) $P_0=98 \text{ Н}$ (10 кг) для надёжного прижатия наконечника к образцу.

Затем дополнительно прикладывается дополнительная нагрузка P_1 , которая в сумме с предварительной нагрузкой составляют общую нагрузку P , прикладываемую к испытываемому образцу ($P_0+P_1=P$). При отсчёте числа твёрдости нагрузка P уменьшается до P_0 .

Таким образом, твёрдость по Роквеллу характеризуется разницей между максимальной глубиной проникновения в материал наконечника (выраженной в делениях шкалы прибора) и остаточной глубиной его проникновения после снятия основной нагрузки.



Существует 11 шкал определения твердости по методу Роквелла (А; В; С; D; E; F; G; H; K; N; T), основанных на комбинации «индентор (наконечник) — нагрузка».

Как правило, в приборах для измерения твёрдости по Роквеллу используются шкалы А, В и С.

Отсчёт по **шкалам А и С** (на циферблате индикатора прибора эти шкалы имеют **черный цвет**) производится при вдавливании в испытуемый образец алмазного наконечника.

Отсчёт по **шкале В** (на циферблате индикатора эта шкала **красного цвета**) производится при вдавливании в образец стального шарика.

Шкала	Индентор	Нагрузка, кгс
А	Алмазный конус с углом 120° при вершине	60 кгс
В	Шарик диаметром 1/16 дюйма из карбида вольфрама (или закалённой стали)	100 кгс
С	Алмазный конус с углом 120° при вершине	150 кгс



Шкалу А применяют для испытания твёрдых сплавов, тонкого листового материала и для определения твердости тонкого верхнего слоя поверхности.

Шкалу В применяют для испытаний металлов средней твёрдости.

Шкала С служит для определения твёрдости термически обработанной стали.

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

Для обозначения твёрдости, определённой по методу Роквелла, используется символ HR, к которому добавляется буква, указывающая на шкалу, по которой проводились испытания (HRA, HRB, HRC).

Размерный эффект (*indentation size effect*)

Измеряемая **твердость зависит от нагрузки**, прикладываемой к индентору. Характер зависимости твердости от нагрузки определяется формой индентора:

для сферического индентора — с увеличением нагрузки твердость **увеличивается** — *обратный размерный эффект (reverse indentation size effect)*;

для индентора в виде пирамиды Виккерса или Берковича — с увеличением нагрузки твердость **уменьшается** — *прямой или просто размерный эффект (indentation size effect)*;

для сфероконического индентора (типа конуса для твердомера Роквелла) — с увеличением нагрузки твердость сначала **увеличивается**, когда внедряется сферическая часть индентора, а затем начинает **уменьшаться** (для сфероконической части индентора).

Число твёрдости по Роквеллу можно перевести в число твёрдости по Бринеллю, пользуясь табличными данными:

Виккерс	Бринелль	Роквелл	σ_s	Виккерс	Бринелль	Роквелл	σ_s
HV	HB	HRB	МПа	HV	HB	HRC	МПа
100	100	52,4	333	245	245	21,2	815
105	105	57,5	350	250	250	22,1	835
110	110	60,9	362	255	255	23,0	855
115	115	64,1	382	260	260	23,9	865
120	120	67,0	402	265	265	24,8	880
125	125	69,8	410	270	270	25,6	900
130	130	72,4	430	275	275	26,4	910
135	135	74,7	450	280	280	27,2	930
140	140	76,6	470	285	285	28,0	950
145	145	78,3	480	290	290	28,8	970
150	150	79,9	500	295	295	29,5	980
155	155	81,4	520	300	300	30,2	1000
160	160	82,8	530	310	310	31,6	1030
165	165	84,2	550	320	319	33,0	1060
170	170	85,6	565	330	328	34,2	1090
175	175	87,0	580	340	336	35,3	1120
180	180	88,3	600	350	344	36,3	1150
185	185	89,5	620	360	352	37,2	1180
190	190	90,6	640	370	360	38,1	1200
195	195	91,7	650	380	368	38,9	1230
200	200	92,8	665	390	376	39,7	1260
205	205	93,8	685	400	384	40,5	1290
210	210	94,8	695	410	392	41,3	1305
215	215	95,7	715	420	400	42,1	1335
220	220	96,6	735	430	408	42,9	1365
225	225	97,5	745	440	416	43,7	1385
230	230	98,4	765	450	425	44,5	1410
235	235	99,2	785	460	434	45,3	1440
240	240	100,0	795	470	443	46,1	1480
				490		47,5	
				500		48,2	
				520		49,6	
				540		50,8	
				560		52	
				580		53,1	
				600		54,2	

Метод Шорра

Твёрдость по Шору (метод вдавливания) — для низкомодульных материалов (полимеров).

Твёрдость по Шору (метод отскока) — для высокомодульных материалов (металлов).



Твёрдость по Шору (метод вдавливания) — твёрдость определяется по глубине проникновения в материал специальной закаленной стальной иглы (индентора) под действием калиброванной пружин



В данном методе измерительный прибор именуется дюрометром.



Continental

Место изготовления Германия

Максимальная скорость **T/190 км/ч**

Рисунок протектора асимметричный

Глубина рисунка протектора 9,3-9,6 мм

Твердость резины по Шору 49 ед

Количество шипов/среднее

выступление до/после тестов 110/1,7/1,7
мм

Масса шины 10,4 кг

Соотношение цена/качество 7,3



Michelin

Место изготовления Россия

Максимальная скорость **T/190 км/ч**

Рисунок протектора направленный

Глубина рисунка протектора 9,4-9,6 мм

Твердость резины по Шору 55-56 ед.

Количество шипов/среднее

выступление до/после тестов 128/1,5/1,6
мм

Масса шины 9,4 кг

Соотношение цена/качество 6,8

Nokian

Место изготовления Финляндия

Максимальная скорость **T/190 км/ч**

Рисунок протектора направленный

Глубина рисунка протектора 9,2-9,4 мм

Твердость резины по Шору 55 ед

Количество шипов/среднее

выступление до/после тестов 128/1,7/1,7
мм

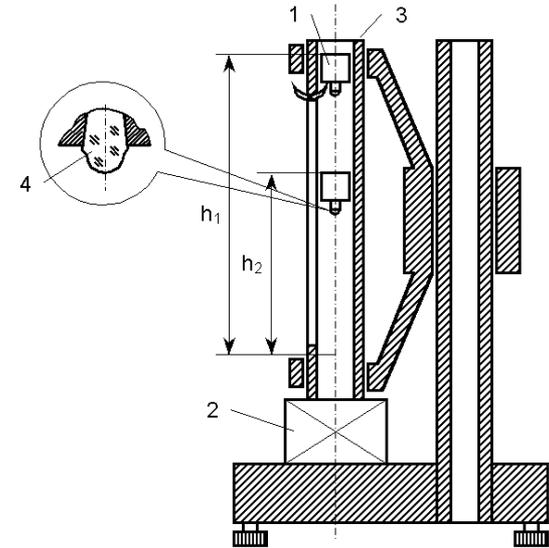
Масса шины 9,6 кг

Соотношение цена/качество 7,7

Твёрдость по Шору (метод отскока) — твердость определяется по высоте, на которую после удара отскакивает специальный боёк, падающий с определённой высоты.

Боек определенной массы с алмазным наконечником свободно и вертикально падает с определенной высоты на испытуемую поверхность.

В данном методе измерительный прибор именуется **склероскоп**.



Метод отскока не дает точных показаний, так как высота отскокивания бойка зависит не только от твердости испытуемого металла, но и от множества других причин: от толщины металла, от степени шероховатости его поверхности, внутренней структуры и т. д.

Однако этот метод, вследствие его простоты и оперативности, часто применяется в заводской практике — преимущественно для быстрого контроля результатов термической обработки стальных изделий (закалки и отпуска).

Он так же позволяет производить измерения прямо на готовых изделиях, крупногабаритных деталях и криволинейных поверхностях.

Глубина проникновения или Высота отскока бойка принимаются за характеристику твердости и измеряется в условных единицах.

Соотношение между некоторыми шкалами дюрометров Шора

A	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
B				6	12	17	22	27	32	37	42	47	51	56	62	66	71	76	81	85
C						9	12	14	17	20	24	28	32	37	42	47	52	59	70	77
D						6	7	8	10	12	14	16	19	22	25	29	33	39	46	58
O	8	14	21	28	35	42	48	53	57	61	65	69	72	75	79	84				
OO	45	55	62	70	76	80	83	86	88	90	91	93	94	95	97	98				

Для измерения дюрометром Шора применяется 12 шкал измерений (A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S и R), используемых для материалов с различными свойствами.

Все шкалы делятся от 0 до 100 условных единиц, при этом высокие значения соответствуют более твердым материалам.

Обозначается **HS_x**, где **H** — *Hardness*, **S** — *Shore* и **x** — латинская буква, обозначающая тип шкалы, использованной при измерении. Например: **85HSD**.

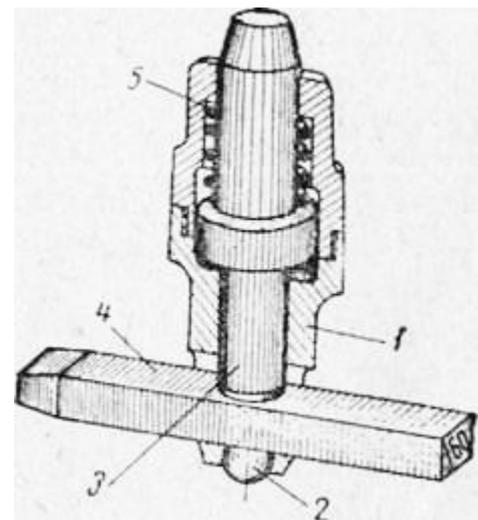
Твердость металла в полевых условиях определяют с помощью **молотка Польди**.
Прибор состоит из державки 5, бойка 3, шарика 2, установленного между двумя пружинящими лапками державки, и контрольного бруска-эталоны 4.
Брусоч-эталон прижимается к шарикy спиральной пружины 5.
Твердость эталона по Бринелю известна заранее.

При испытании прибор устанавливают перпендикулярно на зачищенную поверхность испытуемого металла 6. Затем ручным молотком наносят удар средней силы по бойку. **Шарик одновременно вдавливаются в испытуемый материал и в эталон.** С помощью специальной лупы измеряют диаметры отпечатков и по сравнительной таблице размеров отпечатков находят твердость металла по Бринелю.

Можно также твердость эталонного стержня рассчитать по формуле

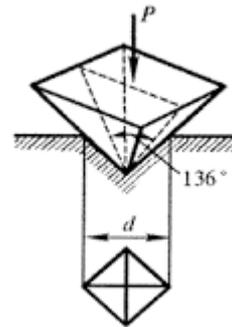
$$HB = HB_0 \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_0^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}}$$

где D, d, d₀ — диаметры соответственно шарика, отпечатка на исследуемой поверхности и на эталонном стержне, мм.



Метод Виккерса

Метод Виккерса — твёрдость определяется по площади отпечатка, оставляемого четырёхгранной алмазной пирамидкой с углом 136° между противоположными гранями, вдавливаемой в поверхность.



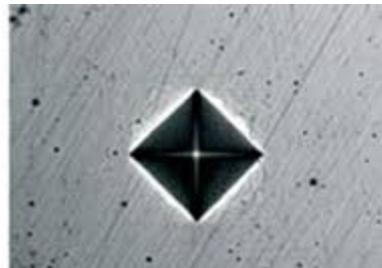
Алмаз продавливает поверхность материала при нагрузках приблизительно 120 кгс, а размер отпечатка (обычно не более 0.5 мм) измеряется на калиброванном микроскопе.

Твёрдость вычисляется как **отношение нагрузки**, приложенной к пирамидке, к **площади отпечатка** (причём площадь отпечатка берётся как площадь части по пирамиды, а не как площадь ромба);

размерность единиц твёрдости по Виккерсу **кгс/мм²**.



Твёрдость, определённая по этому методу, обозначается **HV**;

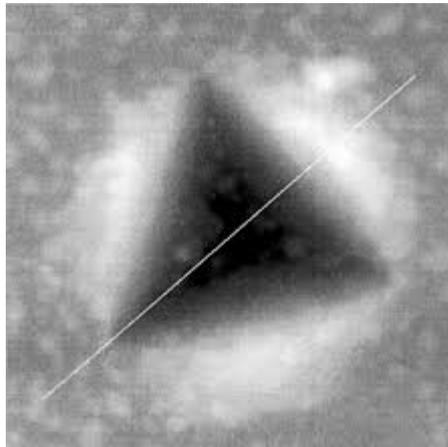


Твердость по Виккерсу

Нагрузка может изменяться в пределах от 1 до 100 кгс (от 10 до 1000 Н).
Значения твердости (до 450 НВ) по Бринеллю и Виккерсу практически равны.

Микротвердость

Для измерения очень тонких слоев или отдельных фаз сплава используют метод измерения *микротвердости* при нагрузке от 1 до 500 г (от 0,01 до 5 Н), которая также определяется в единицах НВ.



Размерный эффект (*indentation size effect*)

Измеряемая **твердость зависит от нагрузки**, прикладываемой к индентору. Характер зависимости твердости от нагрузки определяется формой индентора:

для сферического индентора — с увеличением нагрузки твердость **увеличивается** — *обратный размерный эффект (reverse indentation size effect)*;

для индентора в виде пирамиды Виккерса или Берковича — с увеличением нагрузки твердость **уменьшается** — *прямой или просто размерный эффект (indentation size effect)*;

для сфероконического индентора (типа конуса для твердомера Роквелла) — с увеличением нагрузки твердость сначала **увеличивается**, когда внедряется сферическая часть индентора, а затем начинает **уменьшаться** (для сфероконической части индентора).