

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра металлорежущих станков и инструментов

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«**Материаловедение**» для обучающихся технических
направлений и специальностей всех форм обучения

Составитель В. В. Драчев

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 4 от 20.11.2019
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления 27.03.02
Протокол № 5 от 21.11.2019
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2020

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение методов измерения твердости.
2. Приобретение практических навыков измерения твердости различными методами.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Твердость и методы её измерения

Твердостью называют свойство материала оказывать сопротивление проникновению в его поверхность другого, более твердого тела. Измерение твердости вследствие быстроты и простоты осуществления, а также возможности без разрушения изделия судить о его свойствах получило широкое распространение для контроля качества металла в изделиях.

Существуют следующие методы измерения твердости: по Бринеллю (ГОСТ 9012-59), по Роквеллу (ГОСТ 9013-59), по Виккерсу (ГОСТ 2999-75), измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (ГОСТ 9450-76), методом ударного отпечатка (ГОСТ 18661-73), методом упругого отскока бойка (ГОСТ 23273-78), измерение пластической твердости (ГОСТ 18835-73). Наибольшее распространение нашли первые три метода измерения твердости.

2.2. Измерение твердости по Бринеллю

При измерении твердости методом Бринелля шарик из закаленной стали или твердого сплава вдавливается в испытуемый образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной в течение определенного времени (от 10 до 15 с для черных металлов и от 10 до 180 с для цветных). Диаметры применяемых шариков 1,0; 2,0; 2,5; 5 и 10 мм. Нагрузка выбирается в пределах от 9,8 Н (1 кгс) до 29420 Н (3000 кгс).

Число твердости по Бринеллю определяется путем деления нагрузки, при которой происходило вдавливание, на площадь поверхности отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки, по формуле

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1)$$

где P – нагрузка, кгс;

F – площадь поверхности отпечатка, мм²;

D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Или, если нагрузка измеряется в ньютонах:

$$HB = \frac{0.102 \cdot P}{F} = \frac{0.102 \cdot 2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (2)$$

Чтобы не производить каждый раз вычисления, на практике пользуются специально составленной таблицей (см. приложение).

Диаметр шарика и нагрузку выбирают по табл. 1 так, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах от $0,25$ до $0,6D$.

Поверхность образца для испытания должна быть свободна от окалины и других посторонних веществ. Толщина образца – не менее восьмикратной глубины отпечатка. Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее $2,5d$, а между центрами двух соседних отпечатков – не менее $4d$ (d – диаметр отпечатка, мм). Для мягких материалов (НВ менее 35) соответственно $3d$ и $6d$.

Твердость по Бринеллю измеряют приборами различных конструкций, отличающихся способом приложения нагрузки: механическим (вручную или от электромотора) или гидравлическим. Диаметр отпечатка измеряют с помощью отсчетного микроскопа, входящего в состав приборов, в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вычисляют как среднее арифметическое двух измерений.

При измерении твердости шариком диаметром 10,0 мм с нагрузкой 29430 Н (3000 кгс) и выдержкой 10–15 с число твердости по Бринеллю обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами НВ при применении стального шарика или НВW при применении шарика из твердого сплава.

Например: 400 НВ

Таблица 1

Параметры испытания при измерении твердости по Бринеллю

Металлы и сплавы	Интервал твердости <i>НВ</i>	Диаметр шарика <i>D</i> , мм	Нагрузка <i>P</i> , Н (кгс)
Сталь, чугун и др. высокопрочные сплавы	96–450	1,0	294,2 (30)
		2,0	1177 (120)
		2,5	1839 (187,5)
		5,0	7355 (750)
		10,0	29420 (3000)
Титан и его сплавы	50–220	10,0	14710 (1500)
Медь, алюминий и их сплавы	32–200	1,0	98,07 (10)
		2,0	392,3 (40)
		2,5	612,9 (62,5)
		5,0	2452 (250)
		10,0	9807 (1000)
Магний и его сплавы	16–100	1,0	49,03 (5)
		2,0	196,1 (20)
		2,5	306,0 (31,2)
		5,0	1226 (125)
		10,0	4903 (500)
Подшипниковые сплавы	8–50	1,0	24,52 (2,5)
		2,0	98,07 (10)
		2,5	153,0 (15,6)
		5,0	612,9 (62,5)
		10,0	2452 (250)
Свинец, олово и другие мягкие металлы	3,2–20	1,0	9,807 (1)
		2,0	39,23 (4)
		2,5	60,80 (6,2)
		5,0	245,2 (25)
		10,0	980,7 (100)

При других условиях измерения обозначение *НВ* (*НВW*) дополняется индексом, указывающим условия измерения в следующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки.

Например: 200 *НВ* 5/250/30 – число твердости по Бринеллю 200, испытание проводилось шариком диаметром 5,0 мм при нагрузке 2453 Н (250 кгс), приложенной в течение 30 с.

Достоинства метода Бринелля:

1. Высокая точность и хорошая воспроизводимость результатов измерения.

2. Существование зависимости между числом твердости по Бринеллю и временным сопротивлением при растяжении σ_B , МПа (для углеродистых сталей $\sigma_B \approx 3,4$ НВ, для медных сплавов $\sigma_B \approx 4,5$ НВ, для алюминиевых сплавов $\sigma_B \approx 3,5$ НВ).

Недостатки метода:

1. При использовании стального шарика невозможно испытать материалы твердостью более 450 НВ (закаленные стали, белые чугуны).

2. Невозможность испытания твердости тонкого поверхностного слоя (менее 1 мм), а также изделий малых размеров.

3. После испытания остаются большие и глубокие отпечатки.

Таким образом, метод Бринелля используется для испытания материалов низкой и средней твердости – цветных металлов и их сплавов, незакаленных сталей. Метод применим для определения твердости неоднородных по структуре сплавов (чугуны, подшипниковые сплавы). Так как к поверхности испытываемых изделий не предъявляется высоких требований, метод Бринелля широко используется в цеховых условиях.

2.3. Измерение твердости по Роквеллу

При измерении твердости методом Роквелла в испытуемый образец или изделие вдавливаются алмазный конус с углом при вершине 120° или стальной закаленный шарик диаметром 1,588 и 3,175 мм под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок: предварительной P_0 и основной P_1 . Общая нагрузка $P = P_0 + P_1$.

Твердость определяют по глубине внедрения наконечника в испытуемый образец, измеренной после снятия основной нагрузки при сохранении предварительной. За единицу твердости по Роквеллу принята условная величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм.

В зависимости от материала испытуемого образца твердость измеряют по девяти шкалам: А, С, D (используют алмазный

конус), В, F, G (стальной шарик диаметром 1,588 мм), E, H, K (стальной шарик диаметром 3,175 мм). Чаще всего используют шкалы А, В и С (табл. 2).

Таблица 2

Параметры испытания при измерении твердости по Роквеллу

Обозначение		Наконечник	Нагрузка, Н (кгс)			Пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу	Область применения
шкал	чисел твердости		P_0	P_1	P		
В	HRВ	Стальной шарик диаметром 1,588 мм	98 (10)	883 (90)	981 (100)	25–100	Цветные сплавы, не термообработанные стали
С	HRC	Алмазный конус	98 (10)	1373 (140)	1471 (150)	22–68	Твердые термобработанные стали
А	HRA	Алмазный конус	98 (10)	490 (50)	588 (60)	70–85	Сверхтвердые сплавы, тонкие поверхностные слои, тонколистовой материал

Поверхность образца для испытания может быть как плоской, так и криволинейной с радиусом кривизны не менее 15 мм. Поверхность должна быть свободна от окалины и других посторонних веществ, на ней не должно быть трещин, выбоин и т.п. Минимальная толщина образца должна быть не меньше десятикратной глубины внедрения наконечника после снятия основной нагрузки. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее 2 мм, от центра отпечатка до края образца – не менее 1 мм.

Твердость измеряют на приборах с ручным или электрическим приводом. Результаты испытания читаются прямо по шкале

прибора, без дополнительных измерений. На каждом образце должно быть произведено не менее трех испытаний.

Твердость по Роквеллу обозначают цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами HR с указанием шкалы твердости.

Например: 50 HRC – твердость по Роквеллу 50, определенная по шкале С.

К достоинствам метода Роквелла относятся:

1. Возможность испытания как мягких, так и твердых материалов.
2. Быстрота измерения.
3. Сохранение качественной поверхности после испытания, так как отпечаток имеет небольшие размеры.

Недостатки метода:

1. Безразмерность и условность чисел твердости, что затрудняет их перевод в другие величины твердости или прочности при растяжении.
2. Менее удовлетворительная, чем у метода Бринелля, повторяемость результатов измерений.
3. Невозможность измерения твердости очень тонких слоев металла (менее 0,3 мм).
4. Метод не рекомендуют применять для определения твердости неоднородных по структуре сплавов (например чугуна).

Несмотря на указанные недостатки, метод Роквелла, благодаря своей простоте и простоте, нашел самое широкое применение в промышленности для контроля твердости готовых штучных деталей.

2.4. Измерение твердости по Виккерсу

Измерение твердости методом Виккерса основано на вдавлении алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136° в образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной в течение определенного времени (обычно 10–15 с). Нагрузка выбирается в пределах от 9,8 Н (1 кгс) до 980,7 (100 кгс).

Твердость по Виккерсу вычисляют путем деления нагрузки на площадь поверхности отпечатка, оставшегося на образце, по формуле

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1.854 \frac{P}{d^2}, \quad (3)$$

где P – нагрузка, кгс;

F – площадь поверхности отпечатка, мм²;

α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136°;

d – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Или, если нагрузка измеряется в ньютонах:

$$HV = \frac{0.102 \cdot 2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0.189 \frac{P}{d^2}. \quad (4)$$

Нагрузку выбирают в зависимости от толщины образца и его примерной твердости по табл. 3.

Поверхность используемого образца должна быть тщательно отшлифована (шероховатость Ra не более 0,16 мкм), на ней не должно быть окисных пленок и других посторонних веществ. Радиус кривизны поверхности не менее 5 мм. Минимальная толщина стальных образцов должна быть больше диагонали отпечатка в 1,2 раза, а образцов из цветных металлов – в 1,5 раза. Расстояние между центром отпечатка и краем образца или краем соседнего отпечатка – не менее 2,5 длины диагонали отпечатка.

Нагрузка при измерении твердости по Виккерсу

Толщина образца или поверхностного слоя, мм	Наибольшая допустимая нагрузка, Н (кгс), при твердости					
	100	200	400	600	800	1000
0,1	-	-	9,8(1)	9,8(1)	9,8(1)	19,6(2)
0,2	9,8(1)	9,8(1)	19,6(2)	49,0(5)	49,0(5)	98,1(10)
0,3	9,8(1)	19,6(2)	49,0(5)	98,1(10)	98,1(10)	196,1 (20)
0,4	19,6(2)	49,0(5)	98,1(10)	196,1 (20)	294,2 (30)	294,2 (30)
0,5	49,0(5)	98,1(10)	196,1 (20)	294,2 (30)	294,2 (30)	490,3 (50)
0,6	49,0(5)	98,1(10)	294,2 (30)	490,3 (50)	490,3 (50)	490,3 (50)
0,7	98,1(10)	196,1 (20)	294,2 (30)	490,3 (50)	490,3 (50)	980,7 (100)
0,8	98,1(10)	294,2 (30)	490,3 (50)	490,3 (50)	980,7 (100)	980,7 (100)
0,9	98,1(10)	294,2 (30)	490,3 (50)	980,7 (100)	980,7 (100)	980,7 (100)
1,0	196,1 (20)	294,2 (30)	490,3 (50)	980,7 (100)	980,7 (100)	980,7 (100)
>1,0	980,7 (100)	980,7 (100)	980,7 (100)	980,7 (100)	980,7 (100)	980,7 (100)

Приборы для измерения твердости по Виккерсу имеют встроенный микроскоп или проекционную оптическую систему, с помощью которых измеряют длины диагоналей отпечатка.

Твердость по Виккерсу при испытании под нагрузкой 294,2 Н (30 кгс) и временем выдержки под нагрузкой 10–15 с обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами HV.

Например: 500 HV.

При других условиях испытания после букв HV указывается нагрузка и время выдержки.

Например: 220 HV 10/30 – число твердости 220, полученное при нагрузке 98,1 Н (10 кгс) и времени выдержки 30 с.

Достоинства метода:

1. Возможность измерения твердости как мягких, так и сверхтвердых материалов с высокой точностью.
2. Возможность определения твердости тонких (до 0,3 мм) деталей и очень тонких (до 0,03 мм) поверхностных слоев металла.
3. Очень малые размеры отпечатка.

Недостатки метода:

1. Большая длительность и трудоемкость процесса измерения твердости.
2. Очень высокие требования к качеству поверхности образца.
3. Сравнительная сложность и дороговизна приборов для определения твердости.

Указанные недостатки препятствуют широкому использованию метода Виккерса в цеховых условиях. В основном он применяется для тонкого контроля металлов и сплавов в лабораториях.

3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Прибор для определения твердости по Бринеллю.
2. Прибор для определения твердости по Роквеллу.
3. Прибор для определения твердости по Виккерсу.
4. Шлифовальный станок.
5. Образцы для испытания.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовить образцы к испытанию.
2. Выбрать параметры испытания по табл. 1, 2, 3.
3. Измерить твердость методом Бринелля.
4. Измерить твердость методом Роквелла.
5. Измерить твердость методом Виккерса.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель лабораторной работы.
2. Краткое изложение основных теоретических положений.
3. Результаты испытаний на твердость, сведенные в табл. 4.
4. Выводы о соответствии между значениями твердости, полученными различными методами (использовать приложение).

Таблица 4

Результаты испытаний

№ образца	Материал и тер- мообработка	Твердость по Бринеллю				Твердость по Роквеллу				Твердость по Виккерсу			
		d_1 , мм	d_2 , мм	$d_{ср}$, мм	число твердости	1	2	3	среднее значение	d_1 , мм	d_2 , мм	$d_{ср}$, мм	число твердости

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как проводят измерение твердости методом Бринелля?
2. Какие недостатки имеет метод Бринелля?
3. Как измеряют твердость методом Роквелла?
4. Перечислите основные достоинства и недостатки метода Роквелла.
5. Как определяют твердость по Виккерсу?
6. Какие преимущества имеет метод измерения твердости по Виккерсу по сравнению с методами Бринелля и Роквелла?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение: учебник для студентов вузов / под ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 648 с.
2. Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва : Альянс, 2009. – 528 с.

Соотношение между значениями твердости,
измеряемыми различными методами

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу HV	
диаметр отпечат- ка, мм	число твердо- сти	HRB	HRC	HRA	диаго- наль от- печатка, мм	число твердо- сти
2,30	712	-	68	86	0,233	1022
2,35	682	-	66	85	0,243	941
2,40	653	-	64	84	0,253	868
2,45	627	-	62	83	0,263	804
2,50	601	-	60	82	0,273	746
2,55	578	-	58	81	0,283	694
2,60	555	-	56	79	0,293	649
2,65	534	-	54	78	0,303	606
2,70	514	-	52	77	0,308	587
2,75	495	-	50	76	0,318	551
2,80	477	-	49	76	0,323	534
2,85	461	-	48	75	0,333	502
2,90	444	-	46	74	0,343	473
2,95	429	-	45	73	0,348	460
3,00	415	-	44	72	0,358	435
3,05	401	-	42	71	0,368	412
3,10	388	-	41	71	0,373	401
3,15	375	-	40	70	0,378	390
3,20	363	-	39	70	0,383	380
3,25	352	-	38	-	0,393	361
3,30	341	-	37	-	0,402	344
3,35	331	-	36	-	0,408	335
3,40	321	-	35	-	0,417	320
3,45	311	-	34	-	0,422	312
3,50	302	-	33	-	0,427	305
3,55	293	-	31	-	0,437	291

Продолжение приложения

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу HV	
диаметр отпечат- ка, мм	число твердо- сти	HRB	HRC	HRA	диаго- наль от- печатка, мм	число твердо- сти
3,60	285	-	30	-	0,442	285
3,35	277	-	29	-	0,447	278
3,70	269	-	28	-	0,452	272
3,75	262	-	27	-	0,462	261
3,80	255	-	26	-	0,467	255
3,85	248	-	25	-	0,472	250
3,90	241	100	24	-	0,481	240
3,95	235	99	23	-	0,487	235
4,00	229	98	22	-	0,496	226
4,05	223	97	-	-	0,502	221
4,10	217	97	-	-	0,506	217
4,15	212	96	-	-	0,511	213
4,20	207	95	-	-	0,516	209
4,25	201	94	-	-	0,526	201
4,30	197	93	-	-	0,531	197
4,35	192	92	-	-	0,541	190
4,40	187	91	-	-	0,547	186
4,45	183	89	-	-	0,551	183
4,50	179	88	-	-	0,561	177
4,55	174	87	-	-	0,565	174
4,60	170	86	-	-	0,570	171
4,65	167	85	-	-	0,581	165
4,70	163	84	-	-	0,586	162
4,75	159	83	-	-	0,591	159
4,80	156	82	-	-	0,601	154
4,85	152	81	-	-	0,605	152
4,90	149	80	-	-	0,611	149
4,95	146	78	-	-	0,615	147
5,00	143	76	-	-	0,622	144

Продолжение приложения

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу HV	
диаметр отпечатка, мм	число твердости	HRB	HRC	HRA	диагональ отпечатка, мм	число твердости
5,05	140	76	-	-	-	-
5,10	137	75	-	-	-	-
5,15	134	74	-	-	-	-
5,20	131	72	-	-	-	-
5,25	128	71	-	-	-	-
5,30	126	69	-	-	-	-
5,35	123	69	-	-	-	-
5,40	121	67	-	-	-	-
5,45	118	66	-	-	-	-
5,50	116	65	-	-	-	-
5,55	114	64	-	-	-	-
5,60	111	62	-	-	-	-
5,65	109	61	-	-	-	-
5,70	107	59	-	-	-	-
5,75	105	58	-	-	-	-
5,80	103	57	-	-	-	-
5,85	101	56	-	-	-	-
5,90	99,2	54	-	-	-	-
5,95	97,3	53	-	-	-	-
6,00	95,5	52	-	-	-	-

Примечания:

1. Числа твердости по Бринеллю получены при нагрузке 29430 Н (3000 кгс) и шарике диаметром 10 мм.

2. Числа твердости по Виккерсу получены при нагрузке 294,2 Н (30 кгс).

Составитель
Вячеслав Владиславович Драчев

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«**Материаловедение**» для обучающихся технических
направлений и специальностей всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 13.01.2020. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Уч.-изд. л. 0,7. Тираж 30 экз. Заказ

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП Кузбасского государственного технического университета
имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А.