Энгельсский технологический институт

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Энгельс 2024 г.

**Энгельсский технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.»**

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Методические рекомендации
к лабораторной работе по курсу «Материаловедение»
для студентов всех специальностей и направлений
для студентов направлений

15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
21.03.01 «Нефтегазовое дело»

очной и заочной формы обучения

Энгельс 2023

УДК 620.22 (075.8)
ББК 30.3я73-1
А 86

А 86 Артеменко А.А., Коноплянкин С.В. Измерение твердости металлов и сплавов: Методические рекомендации к лабораторной работе по курсу «Материаловедение» – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2023. – 12 с.

Рецензенты: доцент кафедры «Технология и оборудование электрофизических, электрохимических методов обработки» ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., к.т.н.. Козлов Г.А,;
доцент кафедры «Материаловедение» ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., к.т.н. Попова Н.Е.

Методические рекомендации посвящены изучению методов определения твердости по Бринеллю, Роквеллу и Шору. Рассмотрены достоинства и недостатки указанных методов. Даны справочные данные по переводу твердости при испытании различными методами.

УДК 620.22 (075.8)
ББК 30.3я73-1

Одобрено редакционно-издательским советом
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Брошюра издается в авторской редакции

Цель работы: изучить основные способы измерения твёрдости металлов и сплавов и приобрести практические навыки работы с твердомерами.

Приборы и оборудования: твердомер Роквелла ТК-2, образцы углеродистой стали, твердомер Time TH-130.

Краткие теоретические сведения

Твёрдость – это способность металла или сплава сопротивляться проникновению в него более твёрдого тела определённой формы и размеров, не получающего остаточной деформации. Наиболее распространенные виды испытаний основаны на вдавливании в испытуемую поверхность индентора, т. е. тела определённой формы: шара, конуса, пирамиды. В этих случаях твёрдостью, кгс/мм^2, является отношение нагрузки на индентор, кгс, к площади его отпечатка, мм^2, либо в условных единицах глубины вдавливания этого индентора.

1. Измерение твёрдости методом Бринелля

Определение твёрдости вдавливанием стального закаленного шарика впервые было предложено Бринеллем. Числа твёрдости при измерении этим методом обозначаются индексом "НВ". Твёрдость по Бринеллю НВ определяется вдавливанием в течение определённого времени стального шарика диаметром D, мм, под действием нагрузки P, кгс, в испытываемую плоскую поверхность (рис. 1).

В результате на поверхности образуется отпечаток диаметром d, мм. Число твёрдости определяется как отношение нагрузки, действующей на стальной шарик, к площади поверхности сферического отпечатка:

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

где P – нагрузка, кгс; F – площадь поверхности сферического отпечатка, мм^2; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Диаметр отпечатка измеряется с помощью отсчётного микроскопа типа МБП-2 по схеме, показанной на рис. 2, в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяется как среднее арифметическое значение из этих измерений.

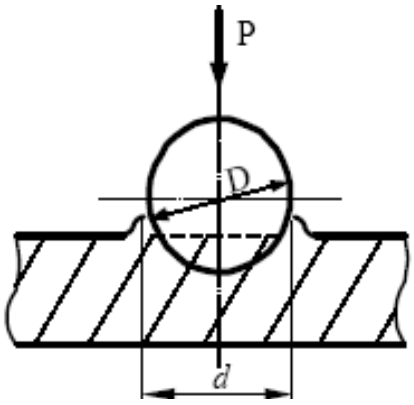

Рис. 1. Схема испытаний:
D – диаметр шарика;
d – диаметр отпечатка

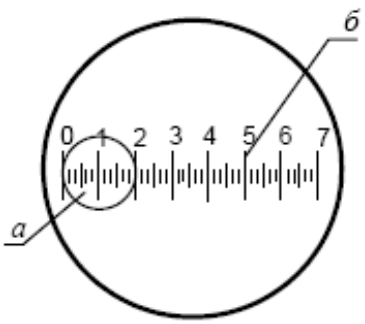

Рис. 2. Схема измерения отпечатка:
а – поверхность отпечатка,
б – шкала отсчётного микроскопа

Диаметры отпечатков должны находиться в пределах: $0{,}2\,D < d < 0{,}6\,D$

Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть на менее 2,5 *d*, а расстояние между центрами двух соседних отпечатков не менее 4 *d*. Для испытания материалов различной твёрдости используются величины нагрузок и диаметры шариков (табл. 1). Пример записи числа твёрдости: 250 НВ 5/750/30. Твёрдость 250 единиц, шарик диаметром 5 мм, нагрузка 750 кг. Время выдержки под нагрузкой 30 с, по умолчанию 10–15 с. На практике, для исключения вычислений числа твёрдости определяются по табл. 2.

К *недостаткам* метода Бринелля относятся:

– невозможность испытания металлов, имеющих твёрдость выше 450 НВ, по причине деформации шарика;

– невозможность испытания изделий с толщиной менее 1…2 мм, так как шарик будет продавливать тонкий слой металла;

– после испытания остаются заметные следы на поверхности изделия, что может вызвать нарушение его дальнейшей работоспособности.

Преимуществами метода являются:

– простота конструкции и надёжность в работе приборов;

– между числами твёрдости и пределами прочности существует *приближенная эмпирическая зависимость* (при других способах определения твёрдости её нет). Например: для сталей с НВ < 175 $\sigma_в$ = 0,34 НВ, для сталей с НВ > 175 $\sigma_в$ = 0,36 НВ.

Таблица 1.

Соотношения диаметра шарика, нагрузки и времени выдержки под нагрузкой от толщины испытуемого образца

Материал	Твёрдость, НВ	Толщина образца, мм	Соотношение между нагрузкой P и диаметром шарика D	Диаметр шарика D, мм	Нагрузка P, кгс	Выдержка под нагрузкой, с
Чёрные металлы и сплавы	140–450	От 6 до 3 От 4 до 2 Менее 2	$P = 30\,D^2$	10 5 2,5	3000,0 750,0 187,0	10
	До 140	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P = 10\,D^2$	10 5 2,5	1000,0 250,0 62,0	10
Цветные металлы и сплавы	Более 130	От 6 до 3 От 4 до 2 Менее 2	$P = 30\,D^2$	10 5 2,5	3000,0 750,0 187,0	30
	35–130	От 9 до 3 От 6 до 3 Менее 3	$P = 10\,D^2$	10 5 2,5	1000,0 250,0 62,0	30
	8–35	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P = 2{,}5\,D^2$	10 5 2,5	250,0 62,5 15,6	60

Таблица 2

Числа твёрдости по Бринеллю

Диаметр отпечатка, мм	Числа твёрдости при нагрузке P, кгс			Диаметр отпечатка, мм	Числа твёрдости при нагрузке P, кгс		
	$30\ D^2$	$10\ D^2$	$2{,}5\ D^2$		$30\ D^2$	$10\ D^2$	$2{,}5\ D^2$
2,90	444	–	–	4,50	179	59,5	14,9
2,95	429	–	–	4,55	174	58,1	14,5
3,00	415	–	34,6	4,60	170	56,8	14,2
3,05	401	–	33,4	4,65	167	55,5	13,9
3,10	388	129,0	32,3	4,70	163	54,3	13,6
3,15	375	125,0	31,3	4,75	159	53,0	13,3
3,20	363	121,0	30,3	4,80	156	51,9	13,0
3,25	352	117,0	29,3	4,85	152	50,7	12,7
3,30	341	114,0	28,4	4,90	149	49,6	12,4
3,35	331	110,0	27,6	4,95	146	48,6	12,2
3,40	321	107,0	26,7	5,00	143	47,5	11,9
3,45	311	104,0	25,9	5,05	140	46,5	11,6
3,50	302	101,0	25,2	5,10	137	45,5	11,4
3,55	293	97,7	24,5	5,15	134	44,6	11,2
3,60	285	95,0	23,7	5,20	131	43,7	10,9
3,65	277	92,3	23,1	5,25	128	42,8	10,7
3,70	269	89,7	22,4	5,30	126	41,9	10,50
3,75	262	87,2	21,8	5,35	123	41,0	10,30
3,80	255	84,9	21,2	5,40	121	40,2	10,10
3,85	248	82,6	20,7	5,45	118	39,4	9,86
3,90	241	80,4	20,1	5,50	116	38,6	9,66
3,95	235	78,3	19,6	5,55	114	37,9	9,46
4,00	229	76,3	19,1	5,60	111	37,1	9,27
4,05	223	74,3	18,6	5,65	109	36,4	9,10
4,10	217	72,4	18,1	5,70	107	35,7	8,93
4,15	212	70,6	17,6	5,75	105	35,0	8,76
4,20	207	68,8	17,2	5,80	103	34,2	8,59
4,25	201	67,1	16,8	5,85	101	33,7	8,43
4,30	197	65,5	16,4	5,90	99,2	33,1	8,26
4,35	192	63,9	16,0	5,95	97,3	32,4	8,11
4,40	187	62,4	15,6	6,00	96,5	31,8	7,96
4,45	183	60,9	15,2				

Примечание. Диаметры отпечатков в таблице даны для шариков диаметром 10 мм. При определении чисел твёрдости с использованием шарика диаметром 5 мм, диаметр отпечатка необходимо умножить на 2, а при испытании шариком диаметром 2,5 мм – на 4.

2. Измерение твёрдости методом Роквелла

Измерение твёрдости методом Роквелла производится вдавливанием индентора (алмазного конуса с углом при вершине 120º и радиусом закругле-

ния 0,2 мм или стального закаленного шарика диаметром 1,588 мм) в испытуемый образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок (предварительной и общей). Общая нагрузка P равна сумме предварительной P_0 и основной P_1. Предварительное нагружение производится с целью исключения влияния упругой деформации и шероховатости поверхности на результаты измерений. Твёрдость по Роквеллу выражается в условных единицах, соответст-вующих осевому перемещению индентора на 0,002 мм.

Схема определения твёрдости по Роквеллу приведена на рис. 3. Индентор вначале вдавливается в испытуемый материал на глубину h_o под действием предварительной нагрузки P_0. При приложении основной нагрузки P_1 в течение 2…6 с индентор вдавливается на глубину h_1. После снятия основной нагрузки остается глубина вдавливания h. Величину твёрдости по Роквеллу можно определить по формуле:

$$HR = \frac{t_{max} - (h - h_0)}{0{,}002},$$

где t_{max} – постоянная величина, устанавливаемая в зависимости от вида индентора (для алмазного конуса – 0,2 мм, а для стального шарика – 0,26 мм).

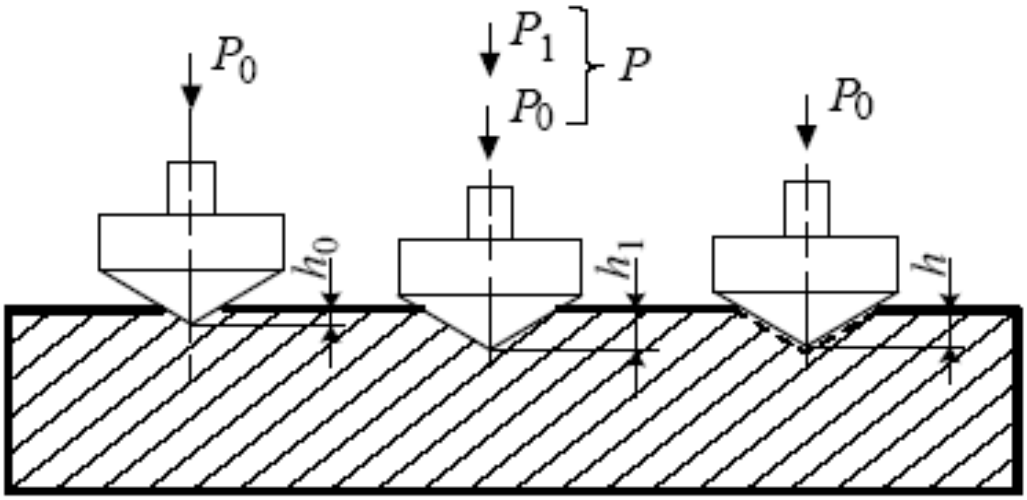

Рис. 3. Схема определения твёрдости

Твердомер Роквелла (рис. 4) оснащён индикатором часового типа (рис. 5), шкала которого разделена на 100 частей. Каждое деление шкалы соответствует осевому перемещению индентора на 0,002 мм. Индикатор имеет две шкалы с одинаковой ценой деления, которые размещены на одном циферблате: черную (наружную) для производства испытаний с алмазным (коническим) наконечником при нагрузках 60 или 150 кгс и красную (внутреннюю) для производства испытаний с шариковым наконечником при нагрузке 100 кгс. Красная шкала смещена относительно нулевого деления черной шкалы на 30 делений.

Необходимость смещения вызвана тем, что при испытании шариком с нагрузкой 100 кгс глубина отпечатка не бывает меньше 0,06 мм и, следовательно, перемещение стрелки по циферблату не бывает меньше 30 делений.

Кроме того, глубина вдавливания часто достигает 0,26 мм, т. е. стрелка делает поворот более, чем на 100 делений.

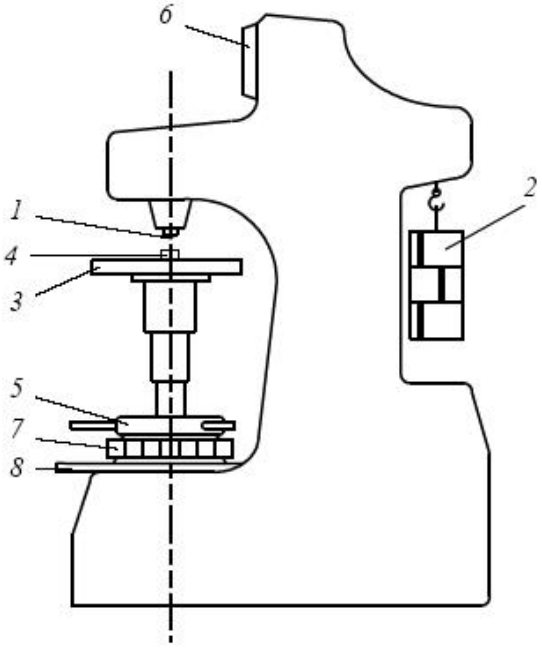

Рис. 4. Твердомер Роквелла ТК-2:
1 – индентор; 2 – грузы; 3 – стол;
4 – образец; 5 – маховик; 6 – индикатор;
7 – барабан; 8 – пусковая клавиша

Рис. 5. Индикатор

Числа твёрдости по Роквеллу определяются с использованием индикатора по формулам:

- при измерениях по чёрной шкале с нагрузкой 60 кгс (шкала А)

$$HRA = 100 - \frac{h - h_0}{0{,}002};$$

- при измерениях по красной шкале с нагрузкой 100 кгс (шкала В)

$$HRB = 130 - \frac{h - h_0}{0{,}002};$$

- при измерении по чёрной шкале с нагрузкой 150 кгс (шкала С)

$$HRC_э = 100 - \frac{h - h_0}{0{,}002}.$$

Шкала А используется для измерения твёрдости тонких изделий и очень твёрдых материалов (например, инструментальных твёрдых сплавов).

Шкала В служит для испытания материалов средней твёрдости.

Шкала С служит для измерения твёрдости закалённых или цементованных изделий. Пределы измерения твёрдости устанавливаются согласно табл. 3.

Таблица 3

Пределы измерения твёрдости

Обозначение		Индентор	Нагрузка, кгс		
шкалы	числа твёрдости		P_0	P_1	P
A	HRA	Алмазный конус	10	50	60
B	HRB	Стальной шарик	10	90	100
C	HRC	Алмазный конус	10	140	150

При измерении твёрдости поверхность образца или изделия должна быть плоской. Испытание образцов с криволинейными поверхностями допускается только при радиусе кривизны не менее 15 мм. В противном случае на образце делают лыску.

Таблица 4

Соотношение чисел твёрдости при испытании различными методами

По Роквеллу			По Бринеллю		По Роквеллу			По Бринеллю	
HRB	HRC	HRA	Диаметр отпечатка, мм	HB	HRB	HRC	HRA	Диаметр отпечатка, мм	HB
–	72	89	2,2	782	97	20	61	4,1	217
–	67	85	2,3	713	95	18	60	4,2	207
–	63	83	2,4	652	93	–	58	4,3	197
–	59	81	2,5	600	91	–	57	4,4	187
–	56	79	2,6	555	88	–	56	4,5	179
–	52	77	2,7	512	86	–	55	4,6	170
–	49	76	2,8	477	84	–	53	4,7	163
–	47	74	2,9	444	82	–	52	4,8	156
–	44	73	3,0	415	80	–	51	4,9	149
–	41	71	3,1	388	76	–	50	5,0	143
–	39	70	3,2	363	75	–	–	5,1	137
–	37	69	3,3	341	72	–	–	5,2	131
–	35	68	3,4	321	69	–	–	5,3	126
–	33	67	3,5	302	67	–	–	5,4	121
–	30	66	3,6	281	65	–	–	5,5	116
–	28	65	3,7	269	62	–	–	5,6	111
–	26	64	3,8	255	59	–	–	5,7	107
100	24	63	3,9	241	57	–	–	5,8	103
98	22	62	4,0	229	54	–	–	5,9	99

Минимальная толщина образца должна быть не менее восьмикратной глубины внедрения наконечника после снятия основной нагрузки $P1$. Она зависит от ожидаемой твёрдости образца и меняется от 2 мм (при самой низкой твёрдости по шкале B) до 0,4 мм (при самой высокой твёрдости по шкале A).

На обратной стороне испытуемого образца после измерения твёрдости не должно быть заметно следов деформации.

Расстояния между центрами двух соседних отпечатков или от центра отпечатка до края образца должны быть не менее 3,0 мм.

Число твёрдости представляет собой среднее арифметическое, как минимум, трёх отдельных измерений и указывается непосредственно за символом, обозначающим метод испытания и использованную шкалу: 80 HRA, 70 HRB, 50 HRC. При необходимости числа твёрдости по Роквеллу можно приближённо перевести в числа твёрдости по Бринеллю (табл. 4).

3. Измерение твердости методом Шора

При измерении твердости по Шору груз вместе с укрепленным на нем индентором (обычно это стальной шарик) падает с высоты $H_п$ на образец перпендикулярно его поверхности (рис. 6). Твердость по Шору определяется по высоте отскока шарика $H_о$. Шкала твердости разделена на 130 единиц. Она рассчитана таким образом, что твердость закаленной заэвтектоидной стали оказывается равной 100 единиц. Эти приборы используются для экспресс-анализов. Между твердостью по Шору и методом Бринелля есть линейная зависимость, например для стали: HB = 7·HSh.

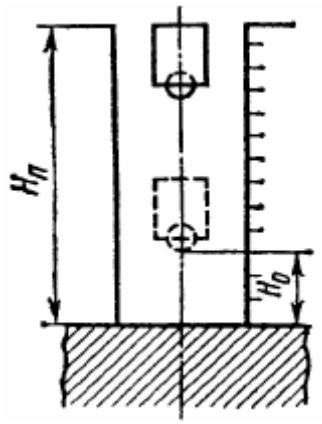

Рис. 6. Схема определения твердости по Шору

В некоторых случаях, когда применение перечисленных методов невозможно, твердость определяется с помощью тарированных напильников. Этот метод менее точен, но прост и легко применим в цеховых условиях.

Порядок выполнения работы

Измерение твёрдости методом Роквелла на твердомере ТК-2

1. Подготовить твердомер Роквелла ТК-2 (см. рис. 4) к работе, для чего в зависимости от условий испытаний установить соответствующий наконечник *1*, необходимый груз *2*, включить электродвигатель прибора, нулевое значение черной шкалы индикатора (см. рис. 5) установить в строго вертикальное положение.

2. Установленный на столе *3* образец *4* вращением маховика *5* по часовой стрелке привести в соприкосновение с индентором *1* и дальнейшим подъемом стола вместе с образцом приложить предварительную нагрузку *P*0 = 10 кгс. Установку предварительной нагрузки считать законченной при совмещении

малой стрелки с красной точкой на индикаторе *6*. При этом большая стрелка не должна отклоняться от вертикального положения более чем на 5 делений в ту или другую сторону. В случае большего отклонения предварительная нагрузка должна быть снята, а измерение твёрдости производится в другой точке образца. При отклонении большой стрелки индикатора от нулевого значения менее чем на 5 делений требуется их совместить перемещением барабана *7* (см. рис. 4).

3. Создать общую нагрузку нажатием клавиши *8*. После окончания вдавливания основная нагрузка автоматически снимается, большая стрелка индикатора указывает на соответствующей шкале число твёрдости по Роквеллу.

4. Вращением против часовой стрелки маховика *5* стол *3* опускается, освобождая образец *4*.

5. Испытания каждого образца производится не менее трёх раз. При этом значения твёрдости трёх измерений не должны отличаться более чем на пять единиц. В случае большего отклонения замеры необходимо продолжить до соблюдения данного условия.

6. Результаты измерений занести в табл. 5

Измерение твёрдости методом Шора на твердомере TIME TH-130

1. Подготовить твердомер к работе, установив в меню нужную шкалу твердости, направление, тип материала и число измерений.

2. Убедитесь что поверхность исследуемой детали или образца имеет гладкую поверхность и очищена от масла и прочих загрязнений.

3. Если деталь имеет большую массу (более 5 кг) то выберите участок для определения твердости (допустимый радиус скругления не менее 30 мм), при этом минимальная толщина стенки должна быть не менее 5 мм. Менее массивные детали соединяют с опорой, что позволяет определять твердость образцов весом до 100 гр, до 3 мм толщиной. Использование опорного кольца позволяет измерять твердость деталей с радиусом скругления до 12 мм.

4. Нагрузите элемент соударения переместив черный пластины до упора. Поместите тестер на поверхность детали и нажмите на пусковую кнопку. Следующие измерения нужно проводить на расстояний не менее 3 мм от предыдущего.

5. Запишите полученные результаты в табл. 5.

Обработка результатов измерений

1. Найти среднее значение твердости образцов и детали.

2. По табл. 4 перевести числа твёрдости, полученные измерением методом Роквелла, в числа твердости НВ.

3. По известным зависимостям определить прочность образцов.

4. Определите приблизительно марку стали исследуемой детали по таблице 6.

5. В координатах "твёрдость НВ – содержание углерода в образцах С %" построить график и установить зависимость.

Таблица 5

Протокол измерений твёрдости

Номер образца	Результаты измерений				Прочность $\sigma_в$, МПа	Марка стали
	1	2	3	Ср. знач.		
1						
2						
3						
Деталь						

6. В заключение дать сравнительную оценку измерения твёрдости методами Роквелла и Шора.

Таблица 6

Углеродистые качественные конструкционные стали*

Марка стали	Содержание углерода, %	Предел прочности $\sigma_В$, МПа	Марка стали	Содержание углерода, %	Предел прочности $\sigma_В$, МПа
08	0,05–0,12	324	40	0,37–0,45	568
10	0,07–0,14	333	45	0,42–0,50	598
15	0,12–0,19	372	50	0,47–0,55	628
20	0,17–0,24	412	55	0,52–0,60	647
25	0,22–0,30	452	60	0,57–0,65	677
30	0,27–0,35	490	65	0,62–0,70	695
35	0,32–0,40	530	70	0,67–0,75	715

*Выписка из ГОСТ 1050–74

Содержание отчёта

1. Описание цели работы.
2. Физическая сущность единиц твёрдости при измерении методами Бринелля, Роквелла и Шора.
3. Таблица результатов испытаний твёрдости сталей различных марок и детали.
4. График зависимости твёрдости стали от содержания углерода.
5. Вывод по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Что такое твёрдость?
2. Что принимается за единицу твёрдости по Бринеллю?
3. Как осуществляется выбор нагрузки?
4. Условия выбора диаметра шарика.
5. Как определяется твёрдость по методу Бринелля?
6. Способ записи числа твёрдости по Бринеллю.
7. Каковы преимущества метода Бринелля?
8. Каковы недостатки метода Бринелля?

9. На каком расстоянии должны находиться отпечатки от края образца и друг от друга при измерении твёрдости методом Бринелля и Роквелла?
10. Что принимается за единицу твёрдости по Роквеллу?
11. Как выбирается индентор (наконечник) для испытания при использовании метода Роквелла?
12. Как обеспечивается предварительная нагрузка при испытании на твердомере Роквелла?
13. Чему равна нагрузка (предварительная, основная и общая) при измерении твёрдости по шкалам А, В, С?
14. Для измерения каких материалов служат шкалы А, В, С?
15. Как записывается твёрдость по Роквеллу?
16. Как определяют твердость методом Шора?
17. Какие преимущества и недостатки имеет прибор Time TH-130?

Литература

1. Лахтин Ю.М. Материаловедение. / Ю.М. Лахтин Ю.М., В.П. Леонтьева. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
2. Геллер Ю.А. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи: учеб. пособие для вузов / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. 6-е изд., перераб. и доп. М.:Металлургия, 1989. 456 с.

Артеменко Александр Александрович

Коноплянкин Сергей Владимирович

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Ответственный за выпуск Артеменко А.А.
Оригинал-макет Коноплянкин С.В.

Подписано в печать _____
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать RISO.
Объем _____ Тираж _____ Заказ № _____

413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.