

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

# ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

### 1. Цель работы

Целью работы является:

- освоить методы определения твердости металлов и получить навыки работы на приборах Бринелля и Роквелла;
- оценить механические свойства металлов и сплавов путем определения твердости.

### 2. Теоретическая часть

Твердость - это сопротивление материала местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твердого тела - наконечника (индентора). Индентор представляет собой твердое тело (алмаз, твердый сплав, закаленная сталь) определенной геометрической формы (шар, пирамида, конус, игла), вдавливаемое в поверхность образца или изделия.

Испытание на твердость значительно отличается от других методов испытаний. Твердость определяется созданием контактных напряжений, которые возникают при нажатии тел друг на друга по небольшой площадке соприкосновения их между собой.

Наибольшее применение получило измерение твердости вдавливанием. В результате вдавливания с достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, получают пластическую деформацию. После снятия нагрузки на образце (детали) остается отпечаток. Особенность этой деформации в том, что она протекает только в небольшом объеме, окруженном недеформированным металлом. Таким образом, твердость характеризует сопротивление пластической деформации и представляет собой механическое свойство металла, отличающееся от других механических свойств способом измерения.

Малый объем деформируемого металла, возможность проведения испытаний на поверхностях тел различной формы и размеров, на деталях небольшой толщины и в очень тонких слоях металла, не

пользуясь специально изготовленными образцами, быстрота и простота испытания, а также возможность без разрушения изделия судить о его свойствах вследствие существования количественной зависимости между твердостью пластичных металлов и другими механическими свойствами (главным образом пределом прочности) делают испытания на твердость незаменимым производственным методом массового контроля металла. Значения твердости так же, как и другие механические свойства, зависят от химического состава и структуры металла, поэтому измерения твердости широко применяются в промышленности для оценки свойств деталей и качества термической обработки.

Основные способы измерения твердости основаны на вдавливание стального шарика или алмазного конуса.

## 2.1. Схема испытания и величина твердости по Бринеллю

Испытание на твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012-59) производится вдавливанием в испытуемый образец стального шарика определенного диаметра под действием заданной нагрузки в течение определенного времени.

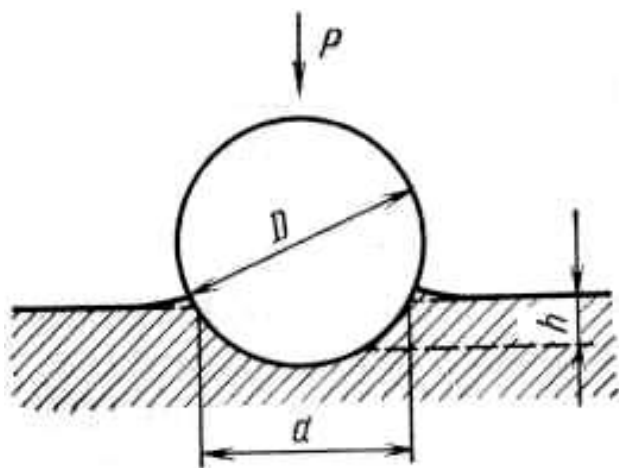


Рис. 5.1. Схема испытания на твердость по способу Бринелля

Схема испытания на твердость по Бринеллю дана на рис. 5.1. В результате вдавливания шарика на поверхности образца получается отпечаток (лунка). Отношение нагрузки  $P$  к поверхности полученного отпечатка (шарового сегмента)  $F$  дает число твердости, обозначаемое  $HB$ :

$$HB = P/F. \quad (5.1)$$

Поверхность  $F$  шарового сегмента:

$$F = \pi Dh, \quad (5.2)$$

где  $D$  – диаметр вдавливаемого шарика, мм;  $h$  – глубина отпечатка, мм.

Так как глубину отпечатка  $h$  измерить трудно, а гораздо проще измерить диаметр отпечатка  $d$ , то целесообразно величину  $h$  выразить через диаметры шарика  $D$  и отпечатка  $d$ :

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}. \quad (5.3)$$

Тогда поверхность  $F$  шарового сегмента, мм<sup>2</sup>:

$$F = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}), \quad (5.4)$$

а число твердости по Бринеллю будет характеризоваться формулой:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (5.5)$$

Число твердости имеет размерность напряжения, однако в соответствии со стандартом размерность не указывается.

### 2.1.1. Прибор для испытания на твердость по Бринеллю

Наиболее распространенным прибором для испытания на твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012-59) является автоматический рычажный пресс, схема которого представлена на рис. 5.2.

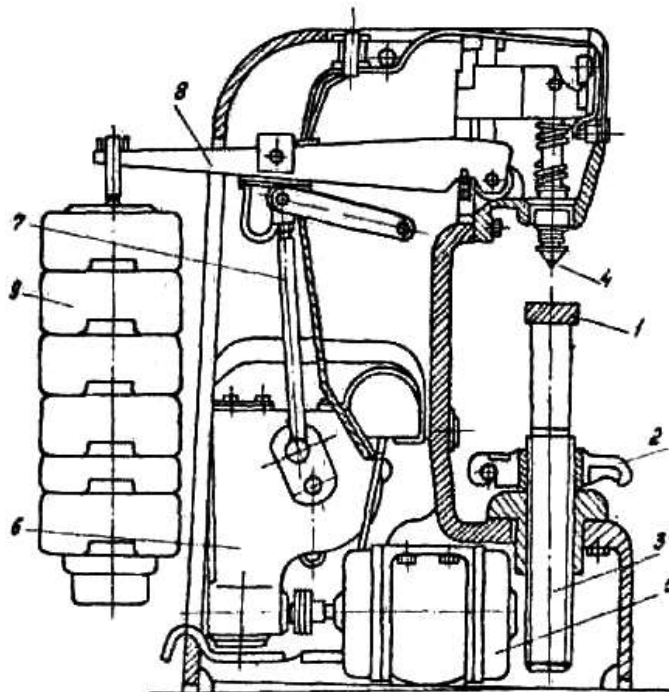


Рис. 5.2. Схема автоматического рычажного пресса ТШ-2 для испытания на твердость по Бринеллю.

Образец устанавливается на опорный столик  $1$  и вращением штурвала  $2$  с помощью подъемного винта  $3$  прижимается к индентору - стальному закаленному шарик  $4$ . Для обеспечения одинакового

поджатия образец поднимается до тех пор, пока указатель на головке прибора не совпадет с риской, или, в зависимости от конструкции прибора, до загорания зеленой лампочки на корпусе прибора. После этого нажатием кнопки на правой стороне корпуса включается привод прибора. От электродвигателя 5 через редуктор 6 и кривошипно-шатунный механизм 7 приводится в движение рычаг 8, который передает нагрузку 9 на шпиндель индентора.

Передача нагрузки, выдержка под нагрузкой, разгрузка и выключение прибора осуществляются автоматически. После снятия образца измеряется диаметр лунки отпечатка.

В зависимости от толщины испытываемого материала в качестве индентора применяют шарики различного диаметра ( $D = 10$ ; 5 и 2,5 мм). Нагрузку  $P$  выбирают в зависимости от качества испытываемого материала. В таблице 5.1 приведены данные по выбору диаметра шарика и нагрузки в зависимости от твердости и толщины испытываемого образца. При испытании шариками разных

Таблица 5.1

Выбор диаметра шарика и нагрузки в зависимости от твердости и толщины испытываемого материала

Материал	Пределы измер. в ед. твердости <i>НВ</i>	Миним. толщина образца, мм	Нагрузка $P$ , Н	Диаметр шарика $D$ , мм	Выдержка под нагрузкой, с
Черные металлы	140-450	6-3	30000	10	10
		4-2	7500	5	
		<2	1875	2,5	
	<140	>6	10000	10	10
6-3	2500	5			
<3	625	2,5			
Цветные металлы	>130	6-3	30000	10	30
		4-2	7500	5	
		<2	1875	2,5	
	35-130	9-3	10000	10	30
		6-3	2500	5	
		<3	625	2,5	
	8-35	>6	2500	10	60
		6-3	625	5	
		<3	156	2,5	

диаметров (10; 5 и 2,5 мм) применяют разные нагрузки; при испытании более мягких металлов нагрузка меньше.

При определении твердости *НВ* шариком  $D = 10$  мм и под нагрузкой  $P = 30000$  Н и времени выдержки 10 с число твердости записывается как, например, *НВ 400* или *НВ 500*, при использовании других условий испытания индекс *НВ* дополняют цифрами, указывающими диаметр использованного шарика, нагрузку и время испытания. Например, *НВ 5/750/30-350* означает, что при использовании шарика диаметром 5 мм, нагрузке 7500 Н и времени испытания 30 с твердость материала по Бринеллю составила 350.

Перед испытанием поверхность образца, в которую будет вдавливаться шарик, обрабатывают наждачным камнем или шкуркой, чтобы она была ровной, гладкой и не было окалины или других дефектов. Подготовка поверхности образца необходима для получения правильного отпечатка и чтобы края его были отчетливо видны для измерения.

### 2.1.2. Методика измерения отпечатка и определение твердости

Полученный отпечаток измеряют с помощью специальной лупы в двух взаимно перпендикулярных направлениях, диаметр отпечатка определяется как среднее арифметическое из двух измерений. Лупа (рис. 5.3, *а*) имеет шкалу, малое деление которой равно 0,1 мм. Лупу нижней опорной частью надо плотно установить на испытываемую

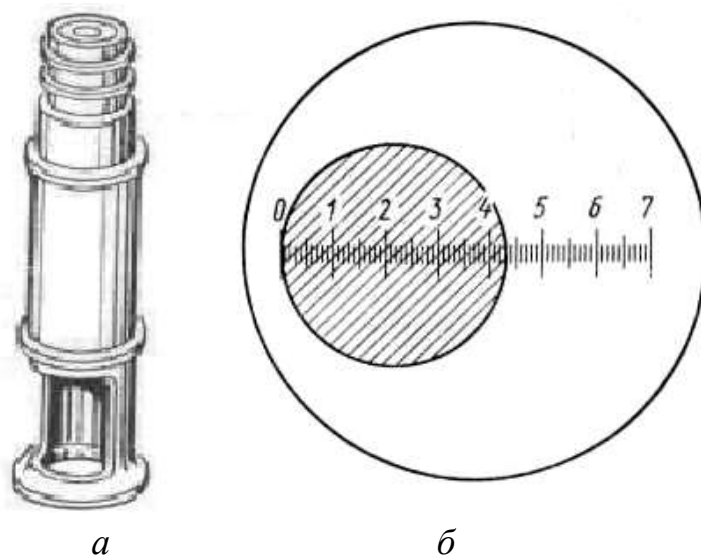


Рис. 5.3. Лупа для измерения отпечатков (*а*) и отсчет по шкале лупы (*б*)

поверхность образца над отпечатком; если лупа не имеет специальной лампочки для освещения поверхности, вырез (окно) в нижней части лупы обратить к свету. Поворачивая окуляр, необходимо добиться, чтобы края отпечатка были резко очерчены.

Затем, передвигая лупу, надо один край отпечатка совместить с началом шкалы (рисунок 5.3, б). Прочитать деление шкалы, с которым совпадает противоположный край отпечатка. Данный отсчет и будет соответствовать размеру диаметра отпечатка (на рисунке диаметр отпечатка  $d = 4,30$  мм). Затем лупу или образец надо повернуть на  $90^\circ$  и измерить диаметр отпечатка второй раз и взять среднее арифметическое значение диаметра для определения твердости.

Чтобы не прибегать к длительным вычислениям твердости по приведенной выше формуле 5.5, на практике пользуются специальной таблицей, которая дает перевод диаметра отпечатка в число твердости  $HV$  (см. приложение).

## 2.2. Схема испытания и величина твердости по Роквеллу

Испытание на твердость по Роквеллу (ГОСТ 9013-59) производят вдавливанием в испытуемый образец (деталь) алмазного конуса с углом  $120^\circ$  или стального закаленного шарика диаметром 1,588 мм (1/16 дюйма). Шарик или конус вдавливают в испытуемый образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок - предварительной  $P_0$  и основной  $P_1$  (рис. 5.4). Общая нагрузка  $P$  будет определяться как:

$$P = P_0 + P_1 . \quad (5.6)$$

В зависимости от типа индентора (шарик или алмазный конус), и от нагрузки, при которой проводят испытание, число твердости обозначают  $HRB$ ,  $HRF$ ,  $HRC$  и  $HRA$ .

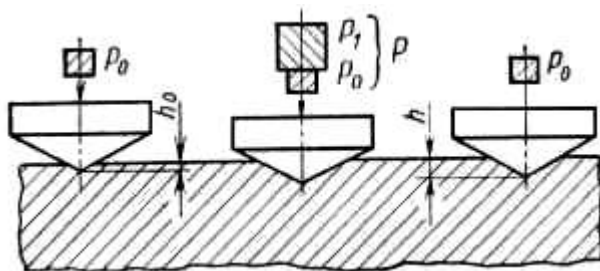


Рис. 5.4. Схема определения твердости вдавливанием алмазного конуса (на приборе Роквелла).

Предварительная нагрузка всех случаях равна 100 Н, основная  $P_1$  и общая  $P$  нагрузки составляют: при вдавливании стального шарика  $P_1 = 900$  Н,  $P = 1000$  Н - шкала В, или  $P_1 = 500$  Н,  $P = 600$  Н - шкала F, при вдавливании алмазного конуса  $P_1 = 1400$  Н,  $P = 1500$  Н - шкала С, или  $P_1 = 500$  Н,  $P = 600$  Н - шкала А.

Число твердости по Роквеллу - число отвлеченное и выражается в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. Число твердости по Роквеллу  $HR$  определяется по формулам: при измерении по шкалам В и F -  $HR = 130 - e$ , при измерении по шкалам С и А -  $HR = 100 - e$ . Величина  $e$  определяется по формуле:  $e = (h - h_0)/0,002$ , где  $e$  - глубина внедрения наконечника в испытуемый материал под действием общей нагрузки  $P$ , измеренная после снятия основной нагрузки  $P_1$  с оставлением предварительной нагрузки  $P_0$ ;  $h_0$  - глубина внедрения наконечника в испытуемый материал под действием предварительной нагрузки  $P_0$  (см. рисунок 5.4).

Определение твердости на приборе типа Роквелла имеет широкое применение, так как этот прибор дает возможность испытывать мягкие, твердые, а также тонкие материалы.

### **2.2.1. Прибор для испытания на твердость по Роквеллу**

Для измерения твердости по Роквеллу применяют прибор типа ТК-2, схема которого приведен на рис. 5.5.

Постоянный груз  $1$  создает нагрузку 500 Н, если установлен груз 2 (400 Н), то создается нагрузка 900 Н, а если установлены грузы 2 и 3 (500 Н), то создается нагрузка 1400 Н. Выбор нагрузки и индентора производят в зависимости от твердости испытываемого металла (таблица 5.2).

Образец устанавливается на столик  $10$  и поворотом маховика  $11$  столик прибора поднимают до начала вдавливания наконечника  $9$  в испытываемую поверхность образца. При дальнейшем подъеме столика начинают вращаться стрелки на циферблате индикатора  $7$ .

На циферблате нанесены две шкалы (рис. 5.6.): черная, (совмещенные шкалы С и А), и красная, (совмещенные шкалы F и В), а также имеются две стрелки – большая, указатель твердости, и маленькая – для контроля величины предварительного нагружения. Подъем столика продолжают до тех пор, пока малая стрелка не дойдет до красной точки, что будет соответствовать предварительной

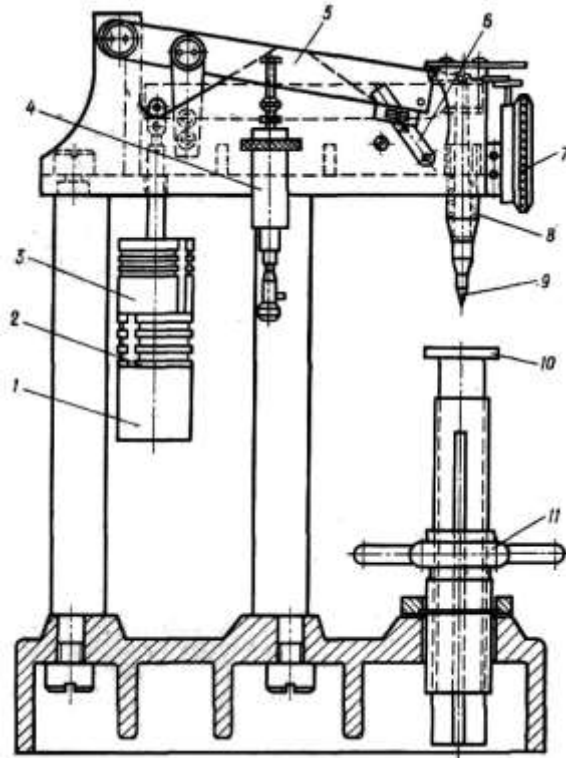


Рис. 5.5. Схема прибора для испытания на твердость по Роквеллу

Таблица 5.2

Выбор нагрузки и индентора для испытаний

Шкала	Число ед-ц в шкале	Обозн. твердости	Полная нагрузка, Н	Допускаемые пределы измер.	Твердость <i>НВ</i>	Область применения
А	100	<i>HRA</i>	600	70-90	Свыше 700	Сверхтвердые сплавы.
С	100	<i>HRC</i>	1500	20-67	230-700	Твердые и термически обработанные сплавы
В	130	<i>HRB</i>	1000	25-100	60-230	Цветные металлы, отожженные сплавы железа
F	130	<i>HRF</i>	600	47-105	49-100	Отожженные цветные сплавы



нагрузке  $P_0$  равной 100 Н. Когда образец получает предварительную нагрузку 100 Н, большая стрелка на циферблате принимает вертикальное или близкое к нему положение. Затем, для обеспечения точности измерения шкалу индикатора поворачивают до совпадения большой стрелки с цифрой 0 черной шкалы.

Твердомер может быть снабжен либо рукояткой *б* и системой рычагов и амортизаторов 4, 5 и 8 для передачи основной нагрузки, либо электрическим приводом.

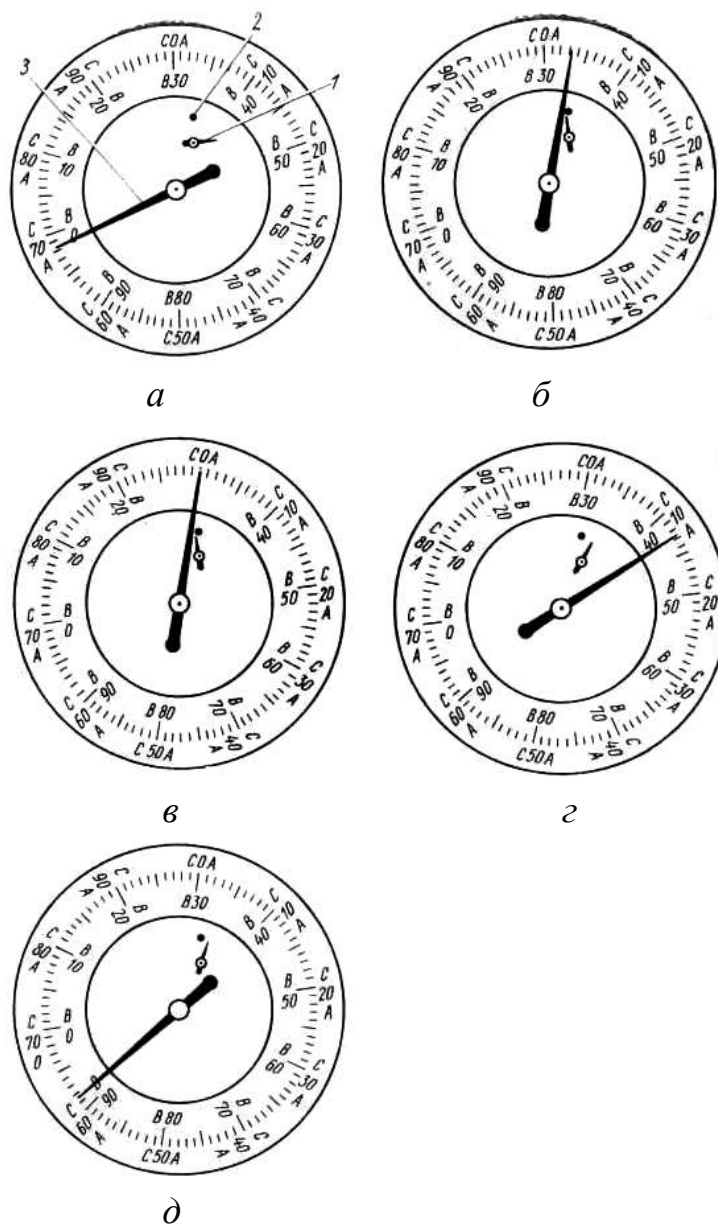


Рисунок 5.6. Последовательное перемещение стрелок на циферблате твердомера при вдавливании алмазного конуса.

*а* – исходное положение, *б* – предварительное нагружение, *в* – установка нуля по черной шкале, *г* – движение стрелки после приложения основной нагрузки, *д* – положение стрелки после снятия основной нагрузки (считывание величины твердости).

Под действием основной нагрузки индентор  $\varnothing$  все глубже проникает в испытываемый образец, при этом большая стрелка индикатора поворачивается против часовой стрелки. При снятии основной нагрузки остается только предварительная нагрузка. При этом большая стрелка индикатора перемещается по часовой стрелке и указывает на шкале индикатора число твердости по Роквеллу.

При испытании алмазным конусом под нагрузкой 1500 или 600 Н отсчет проводят по черной шкале, а при испытании шариком под нагрузкой 1000 Н – по красной шкале. Затем снимают и предварительную нагрузку и освобождают образец.

### **3. Порядок проведения работы**

#### 3.1. Порядок измерения твердости по Бринеллю.

3.1.1. В зависимости от материала испытываемого образца, его толщины выберите диаметр шарика, величину нагрузки и время выдержки.

3.1.2. Поднимите образец маховиком до соприкосновения с шариком и прижмите до тех пор, пока указатель на головке прибора не совпадет с риской, или, в зависимости от конструкции прибора, до загорания зеленой лампочки на корпусе прибора..

3.1.3. Включите привод и после его автоматического отключения опустите столик с образцом вращением маховика.

3.1.4. С помощью лупы измерьте диаметр отпечатка.

3.1.5. Результаты измерения твердости занесите в таблицу 5.3.

#### 3.2. Порядок измерения твердости по Роквеллу.

3.2.1. Выберите опорный столик, индентор и нагрузку в зависимости от материала и формы образца.

3.2.2. Установите образец на опорный столик и вращением маховика поднимите винт до тех пор, пока маленькая стрелка на индикаторе не совпадет с красной точкой.

3.2.4. Вращением шкалы индикатора установите большую стрелку индикатора на цифру 0 по черной шкале.

3.2.5. Нажмите на рукоятку для проведения измерений.

3.2.6. Результаты измерений занесите в таблицу 5.3.

3.3. Для получения сопоставимых результатов все экспериментальные данные переведите в твердость по Бринеллю (см. приложение) и проведите оценку точности различных методов.

Таблица 5.3

Сводная таблица результатов измерений

Материал	Метод измерения твердости	Результат измерения, $H_i$	Твердость по Бриггеллю	Среднее арифметическое значение $H = \frac{1}{n} \sum H_i$	Средне-квадратичная ошибка $s = \sqrt{\frac{\sum (H_i - H)^2}{n - 1}}$
Отожженная низкоуглеродистая сталь	<i>HRB</i>				
Отожженная среднеуглеродистая сталь	<i>HB</i>				
Высокоуглеродистая закаленная сталь	<i>HRC</i>				
Закаленная сталь	<i>HRA</i>				
Дуралюмин Д16	<i>HRF</i>				

#### 4. Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать:

- цель работы;
- краткое описание методов измерения твердости металлов;
- экспериментальные данные в виде таблицы;
- объяснение полученных результатов и оценку точности различных методов определения твердости;
- выводы по работе.

## **5. Контрольные вопросы**

1. Чем обусловлены ограничения в использовании метода Бринелля при измерении твердости твердых и мягких материалов?

2. Необходимо измерить твердость образца размерами 30x30x20 мм, никаких предварительных данных по твердости материала нет. Каковы Ваши действия?

3. После измерения твердости образца по Бринеллю проведено измерение твердости методом Роквелла. Для повышения точности измерения повторные испытания проводились в лунке, полученной при испытаниях по методу Бринелля. Будут ли измерения по методу Бринелля и Роквелла совпадать?

Твердость по Бринеллю

Диаметр отпечатка, мм, $d_{10}$ , $2d_5$ или $4d_{2,5}$	Число твердости при нагрузке $P, H$			Диаметр отпечатка, мм, $d_{10}$ , $2d_5$ или $4d_{2,5}$	Число твердости при нагрузке $P, H$		
	$300D^2$	$100D^2$	$25D^2$		$300D^2$	$100D^2$	$25D^2$
2,90	444	-	-	4,50	179	59,5	14,9
2,95	429	-	-	4,55	174	53,1	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	32,3	4,70	163	54,3	13,6
3,15	375	125	31,3	4,75	159	53,0	13,3
3,20	363	121	30,3	4,80	156	51,9	13,0
3,25	352	117	29,3	4,85	152	50,7	12,7
3,30	341	114	28,4	4,90	149	49,6	12,4
3,35	331	110	27,6	4,95	146	48,6	12,2
3,40	321	107	26,7	5,00	143	47,5	11,9
3,45	311	104	25,9	5,05	140	46,5	11,6
3,50	302	101	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	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	10,5
3,75	262	87,2	21,8	5,35	123	41,0	10,3
3,80	255	84,9	21,2	5,40	121	40,2	10,1
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	34,3	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	95,5	31,8	7,96
4,45	183	60,9	15,2				

Примечания: 1) Индекс 10; 5 и 2,5 у буквы  $d$  означает диаметр шарика в мм. 2) Обозначения  $2d_5$  и  $4d_{2,5}$  указывают, что для отыскания по таблице числа твердости при испытании шариком в 5 мм диаметр отпечатка надо умножить на 2, а при испытании шариком в 2,5 мм - на 4. 3). При испытании черных металлов число твердости следует находить в графе с индексом  $300 D^2$ , при испытании цветных металлов - в графе  $100 D^2$  и  $25 D^2$ .

Соотношения между значениями твердости, измеренной различными методами

Твердость по Роквеллу <i>HRC</i>	Твердость по Бринеллю <i>HB</i>	Твердость по Роквеллу <i>HRC</i>	Твердость по Бринеллю <i>HB</i>
70	-	44	415
69	-	43	404
68	-	42	393
67	-	41	383
66	-	40	372
65	-	39	362
64	-	38	352
63	-	37	332
62	-	36	332
61	-	35	323
60	-	34	313
59	-	33	305
58	-	32	297
57	-	31	290
56	-	30	283
55	-	29	276
54	-	28	270
53	-	27	265
52	-	26	260
51	-	25	255
50	-	24	250
49	-	23	245
48	-	22	240
47	448	21	235
46	437	20	230
45	426		