

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: ознакомиться с методами измерения твердости, провести измерение микротвердости опытного образца.

В промышленности, связанной с обработкой металлов, испытания на твердость являются наиболее распространенными из всех видов механических испытаний. Они производятся значительно чаще, чем определение других механических характеристик металлов: прочности, относительного удлинения и др.

Для определения твердости служат специальные приборы, называемые твердомерами. Рабочим органом каждого твердомера, входящим в контакт с поверхностью испытуемого металла, является наконечник (индентор). Наконечниками могут быть тела различной геометрической формы: шарик, конус, пирамида и др., изготовленные, из материала более твердого, чем испытуемый, например, из закаленной стали, алмаза, твердого сплава.

В зависимости от характера нагрузки, прикладываемой в процессе испытания, различают статическую и динамическую твердость. В первом случае к индентору нагрузка прикладывается плавно, во втором – ударом.

Наиболее распространено определение статической твердости на твердомерах Бринелля, Роквелла и Виккерса путем вдавливания в испытуемый металл соответственно шарика, конуса, пирамиды. Величина внедрения наконечника в поверхность испытуемого металла характеризует его твердость. Чем тверже металл, тем внедрение будет меньше, и наоборот. Таким образом, *твердость* – свойство металла сопротивляться внедрению другого более твердого тела. При внедрении наконечника происходит контактное (местное) приложение нагрузки, под действием которой испытуемый металл пластически деформируется в ограниченном объеме. При этом деформация тем меньше, чем тверже металл. Поэтому можно сказать и так: *твердость* – это сопротивление металла пластической деформации при контактном приложении нагрузки.

Примерами определения динамической твердости могут служить способы Польди и Шора. В первом случае стальной шарик ударом вдавливается одновременно в испытуемый металл и эталонный образец, твердость которого известна. Сравнение полученных отпечатков на эталоне и испытуемом металле позволяет определить твердость последнего. Во втором случае твердость оценивается высотой отскока от испытуемой поверхности бойка, падающего с постоянной высоты: чем выше отскочил боек, тем тверже испытуемый металл. Способ основан на упругих свойствах металла, поэтому его называют способом определения твердости методом упругой отдачи. Выполняется он на приборе, называемом склероскопом Шора. Шкала склероскопа имеет 140 делений. Отскоку в 100 делений соответствует твердость закаленной высокоуглеродистой стали. Вес бойка 2,5 г, его наконечник выполнен из алмаза или закаленной стали. В практике механических испытаний определение динамической твердости по Шору в настоящее время ограничено. Широкое распространение испытаний на твердость объясняется рядом причин. Испытания проводятся быстро, требуют мало времени на подготовку, просты по технике выполнения. При этом часто не требуется изготовление специальных образцов, так как испытания могут выполняться непосредственно на детали без ее разрушения. С по-

мощью переводных таблиц можно сравнить твердость металла, измеренную разными методами (приложение 1).

Между твердостью и другими механическими свойствами существует в ряде случаев зависимость. Например, зная твердость, можно судить о величине прочности на растяжение, пользуясь формулой

$$\sigma_B = K \cdot HB,$$

где: σ_B – предел прочности на растяжение (временное сопротивление), кгс/мм²;

K – коэффициент;

HB – число твердости по Бринеллю.

Значение K , по данным Н. А. Минкевича, И. А. Одингга, Н. В. Гевелинга, следующее:

сталь твердостью HB 120–175	0,34
сталь твердостью HB 175–450	0,35
медь, латунь и бронза отожженные	0,55
медь, латунь и бронза наклепанные.	0,10
алюминий и его сплавы твердостью HB 20–45 ...	0,33–0,36
дуралюмин отожженный	0,36
дуралюмин после закалки и старения.....	0,36.

Однако следует иметь в виду, что общего точного метода перевода чисел твердости, измеренных одним методом, на числа твердости по другим шкалам, а также на прочность при растяжении не существует. Такие переводы делаются, когда для них имеется надежная основа благодаря ранее выполненным сравнительным испытаниям.

Твердость металлов измеряют методами Бринелля, Роквелла, Виккерса, Польди и др.

1 Измерение твердости по Бринеллю

Сущность метода Бринелля состоит в следующем (рисунок 1): в испытуемый металл (образец) 1 под действием заданной нагрузки P в течение определенного времени t вдавливаются стальной закаленный шарик 2 диаметром D . В результате в испытуемом металле получается сферический отпечаток диаметром d . Размер отпечатка (диаметр или площадь) характеризует твердость: чем больше отпечаток, тем мягче испытуемый металл, чем отпечаток меньше – тем металл твёрже. Вдавливание шарика в образец производится на специальном приборе (прессе) Бринелля.

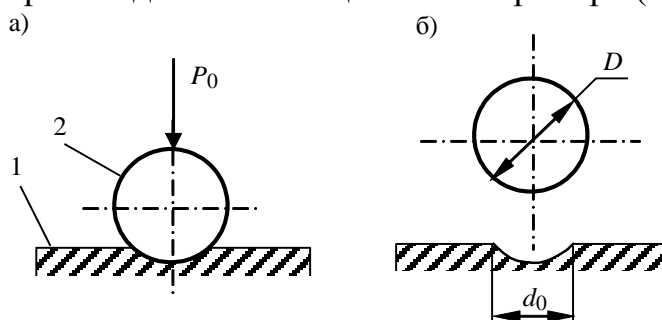


Рисунок 1 – Схема измерения твердости по Бринеллю: а – в процессе вдавливания шарика в образец; б – после снятия нагрузки и удаления шарика.

Измеренная таким образом твердость выражается числом твердости по Бринеллю, которое обозначается символом HB и измеряется в кгс/мм². Число твердости по Бринеллю

$$HB = P/F, \quad (1)$$

где HB – число твердости по Бринеллю, кгс/мм²;

P – нагрузка на шарик, кгс;

F – площадь поверхности сферического отпечатка, мм²,

$$F = [\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})]/2, \quad (2)$$

где: D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Подставляя значения из уравнения (2) в выражение (1), получим

$$HB = 2P/[\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})], \quad (3)$$

Для измерения твердости методом Бринелля применяют различные шарики (диаметром 10; 5; 2,5; 2 и 1 мм), нагрузки P (от 3000 до 15,6 кгс) и выдержки шарика под нагрузкой t (10; 30 и 60 с)

Обозначение чисел твердости, измеренных при различных условиях, принято следующее:

а) при наиболее распространенных условиях испытания ($D = 10$ мм, $P = 3000$ кгс, $t = 10$ с) твердость обозначается буквой HB и числом. Например, запись $HB 300$ означает твердость 300 кгс/мм², измеренную методом Бринелля при этих условиях испытания;

б) при других условиях запись твердости дополняется индексами, указывающими условия испытания. Например, запись $HB 150 5/200/30$ означает число твердости по Бринеллю 150 при испытании шариком $D = 5$ мм под нагрузкой $P = 200$ кгс, приложенной в течение $t = 30$ с.

Испытание включает следующие операции: настройка пресса, получение отпечатка, его измерение и определение числа твердости по формуле (3). Недостатки метода: повреждение поверхности изделия сравнительно большими отпечатками, а также невозможность испытания металлов твердостью более $HB 450$ из-за деформации шарика и тонких поверхностных слоев (менее 1–2 мм), так как шарик продавливает их.

Условия измерения твердости по Бринеллю регламентированы ИСО 410–88, ИСО 6508–86. Ниже приводятся требования стандарта, соблюдение которых необходимо при выполнении испытаний, иначе результаты измерений будут не сравнимы.

Требования к твердомеру. Твердомер должен обеспечить: плавное возрастание нагрузки до необходимого значения; постоянство этой нагрузки в течение установленного времени; приложение усилия P перпендикулярно к поверхности образца; высокую точность нагрузки P .

Требования к шарикам:

- материал для шариков – термически обработанная сталь с твердостью не менее $HV 850$ (HV – твердость по Виккерсу);

- шарик не должен иметь поверхностных дефектов, видимых с помощью лупы при 5-кратном увеличении.

Требования к испытываемому образцу:

- твердость HB не менее 8 и не более 450 единиц при температуре 20 ± 10 °С;
- поверхность образца должна быть свободной от окалины и других посторонних веществ;
- при подготовке образцов не допускать изменения твердости металла, вследствие нагрева или наклепа поверхности при механической обработке;
- минимальная толщина образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка, которая определяется по формуле:

$$h = P / (\pi D \cdot HB), \quad (4)$$

где h – примерная глубина отпечатка, мм;

P – нагрузка на шарик при определении HB , кгс.;

D – диаметр шарика для определения HB , мм;

HB – твердость по Бринеллю кгс/мм².

Таблица 1– Выбор диаметра шарика, нагрузки и выдержки в зависимости от твердости и толщины испытываемого образца

Материал	Интервал твердости по Бринеллю	Минимальная толщина испытываемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой P и диаметром шарика D	Диаметр шарика D , мм	Нагрузка P , кгс (кН)	Выдержка под нагрузкой, с
Черные металлы	140–450	6–3	$P = 30D^2$	10,0	3000,0(29,4)	10
		4–2		5,0	750,0 (7,35)	
		<2		2,5	187,5 (1,84)	
	<140	>6	$P = 10D^2$	10,0	1000,0 (9,8)	10
		5–3		5,0	250,0 (2,45)	
		<3		2,5	62,5 (0,61)	
Цветные металлы	>130	6–3	$P = 30D^2$	10,0	3000,0 (29,4)	30
		4–2		5,0	750,0 (7,35)	
		<2		2,5	187,5 (1,84)	
	35–130	9–6	$P = 10D^2$	10,0	1000,0 (9,8)	30
		6–3		5,0	250,0 (2,45)	
		<3		2,5	62,5 (0,61)	
	8–35	>6	$P = 2,5D^2$	10,0	259,0 (2,54)	60
		6–3		5,0	62,5 (0,61)	
		<3		2,5	15,6 (0,15)	

Требования для измерения твердости:

- диаметры отпечатков d должны находиться в пределах $0,2D < d < 0,6D$; В случае несоблюдения этого условия испытание повторяется с применением соответствующей нагрузки;
- расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее чем $2,5d$, а расстояние между центрами двух соседних отпечатков не менее $4,0d$ (для металлов с $HB < 35$ – соответственно $3,0d$ и $6,0d$);
- после вдавливания шарика на обратной стороне испытываемого образца не должно быть следов деформации. Деформация обратной стороны возникает при несогласованности нагрузки на шарик с толщиной и твердостью образца. Чем тоньше и мягче образец, тем меньше должна быть нагрузка на шарик во избежание продавливания.

1.2 Оборудование, инструмент и материалы

Рычажный пресс Бринелля. Отсчетный микроскоп (лупа Бринелля). Линейка с делениями или штангенциркуль. Образцы металла для измерения твердости.

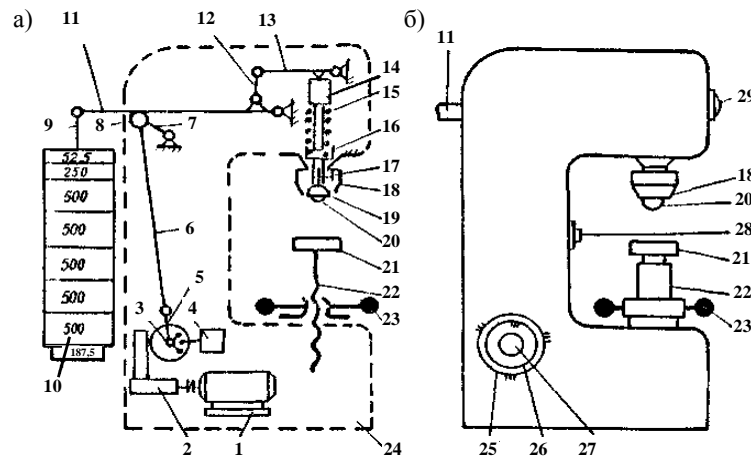


Рисунок 2 – Рычажный пресс Бринелля: а – схема; б – общий вид

Отсчетный микроскоп (лупа Бринелля) служит для измерения отпечатков, полученных на прессе Бринелля. Лупа – оптический прибор высокой точности, требующий внимательного и бережного хранения в специальном футляре. Устройство лупы и изображение, наблюдаемое при рассматривании в лупу отпечатка, показаны на рисунке 3, где 1 – глаз наблюдателя; 2 – окуляр и окулярное кольцо с накаткой; 3 – кольцо с накаткой для поворота шкалы на 90° ; 4 – кольцо с накаткой для наводки на резкость отпечатка; 5 – колонка лупы; 6 – объектив; 7 – окно (вырез в колонке) для освещения отпечатка; 8 – основание лупы; 9 – отверстие в основании.

Работа с лупой. Извлеките лупу из футляра и, не приводя в движение ее элементы, по рисунку 3 ознакомьтесь с основными частями.

ВНИМАНИЕ! В случае обнаружения неисправности лупы не пытайтесь ее устранить, а немедленно доложить преподавателю.

У каждого отпечатка измеряются два диаметра (d_1 и d_2), лежащие во взаимно перпендикулярных направлениях. Для измерения диаметров выполнить следующие операции:

1. Навести на резкость отсчетную шкалу лупы. Для этого: а) взять лупу за колонку левой рукой; б) наблюдать одним глазом в окуляр; в) поворачивать в ту или иную сторону окулярное кольцо 2 до получения четкого изображения шкалы (см. рисунок 3).

Отсчетная шкала имеет деления. Числа на шкале против больших делений указывают расстояние в миллиметрах от начала шкалы, т.е. от нуля. Цена деления шкалы и кратность увеличения указываются на лупе обычно под кольцом 3.

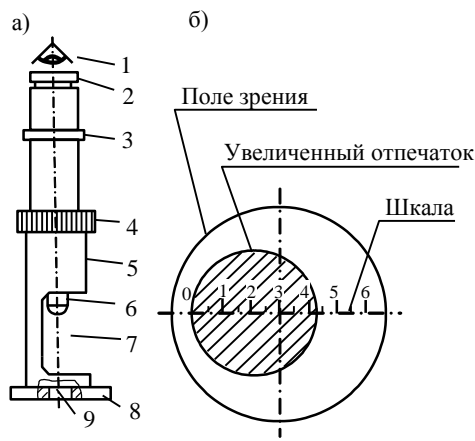


Рисунок 3 – Отсчетный микроскоп (лупа): а – схема; б – изображение, наблюдаемое при просмотре отпечатка

2. Установить лупу основанием 8 на испытуемую поверхность так, чтобы измеряемый отпечаток был в центре отверстия 9, а окно 7 было обращено к свету.

3. Навести на резкость отпечаток. Для этого: а) пальцами левой руки прижать лупу основанием 8 к образцу, не закрывая при этом рукой окна 7; б) наблюдая в окуляр, получить резкое изображение отпечатка в поле зрения, поворачивая правой рукой в ту или иную сторону кольцо 4.

4. Совместить край отпечатка с началом шкалы, осторожно передвигая лупу по поверхности образца так, чтобы шкала проходила по диаметру отпечатка (см. рисунок 3).

5. Прочитать деление шкалы, соответствующее диаметру отпечатка (на рисунке 3 он равен 4,3 мм).

6 Измерить диаметр отпечатка d_2 в направлении, перпендикулярном диаметру d_1 . Для этого: а) прижимая левой рукой лупу к образцу, правой за кольцо 3 повернуть шкалу лупы на 90° ; б) совместить начало шкалы с краем отпечатка, как указано в п.

2 Измерение твердости по Полюди

2.1 Краткие сведения из теории

Испытание на твердость динамическим вдавливанием шарика производится с помощью переносного прибора Полюди, схема которого приведена на рисунке 4. В корпус 4–5 встроены шарик 2, боек 7 и пружина 6. В нижней части корпуса имеется окно, в которое между шариком и бойком вставляется эталонный образец 3. Пружина 6, действуя на боек, плотно прижимает эталонный образец к шартику. Прибор устанавливается на испытуемый металл 1 и по бойку молотком наносится удар произвольной силы. Эталонный образец изготавливается из стали в виде бруска квадратного сечения 12x12 мм. Диаметр вдавливаемого шарика обычно принимается равным 10 мм. Для последующих испытаний эталон в корпусе сдвигается так, чтобы соседние отпечатки отстояли друг от друга на расстоянии не менее 15 мм.

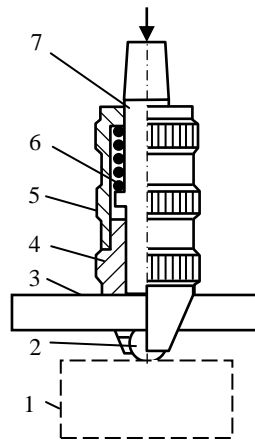


Рисунок 4 – Схема прибора Польди

Определение твердости методом Польди состоит в следующем: одновременно в испытуемый металл и в эталонный образец, твердость которого известна, под действием ударной (динамической) нагрузки вдавливается стальной закаленный шарик.

Твердость по Польди измеряется в тех же единицах, что и твердость по Бринеллю, и определяется сопоставлением значений диаметров отпечатков эталонного образца и испытуемого металла по формуле

$$HB_{мет} = HB_{эт} (D_{ш} - \sqrt{D_{эт}^2 - d_{эт}^2}) / (D_{ш} - \sqrt{D_{эт}^2 - d_{мет}^2}), \quad (5)$$

или по приближенной формуле

$$HB_{мет} = HB_{эт} d_{эт}^2 / d_{мет}^2, \quad (6)$$

где $HB_{мет}$, $HB_{эт}$ – твердости по Бринеллю соответственно испытуемого металла и эталона;

$d_{мет}$, $d_{эт}$ – диаметры отпечатков на испытуемом металле и эталоне, мм;

$D_{ш}$ – диаметр шарика, мм.

В целях экономии времени определение твердости производится по таблицам, рассчитанным заранее по формулам (5) и (6).

Прибор Польди прост и удобен в работе. Однако метод Польди дает значительные ошибки (7–15, а иногда 30 %), что является его существенным недостатком и ограничивает область применения. Приближенность получаемых значений твердости связана главным образом с тем, что шарик вдавливается динамически, а твердость HB определяется по методике статического испытания. К методу Польди прибегают в следующих случаях:

- а) для ориентировочных суждений о твердости металла;
- б) при необходимости определения твердости массивных изделий (станин, конструкций, крупных поковок и отливок, которые не могут быть установлены на прессе Бринелля);
- в) при проведении полевых испытаний.

2.2 Оборудование и материалы

Прибор Польди. Эталонный образец. Молоток. Наковальня. Образцы металла для измерения твердости. Отсчетный микроскоп (лупа Бринелля).

2.3 Порядок выполнения работы

- 1 Ознакомиться с описанием прибора Польди.

- 2 Вставить эталонный образец между шариком и бойком прибора.
- 3 Проверить подготовку поверхности испытуемого образца. Она должна быть выровнена и зачищена до металлического блеска.
- 4 Положить испытуемый образец на наковальню.
- 5 Выбрать на образце место для получения отпечатка.
- 6 Установить прибор и удерживать его в строго вертикальном положении.
- 7 Ударить молотком по бойку.
- 8 Извлечь эталонный образец из прибора.
- 9 Измерить с помощью лупы Бринелля диаметр полученного отпечатка на испытуемом и эталонном образцах. Измерения произвести в двух взаимно перпендикулярных направлениях (d_1 и d_2). Определить расчетный диаметр отпечатка d_{cp} как среднее арифметическое двух измерений.
- 10 По формуле (5) или (6) определить число твердости по Полюди, пользуясь расчетным диаметром отпечатка.

3 Измерение микротвердости по Виккерсу

3.1 Краткие сведения из теории

Испытание на микротвердость применяется для определения твердости объектов, которые не могут быть испытаны обычными методами (по Бринелю, Роквеллу, Виккерсу): мелких деталей приборов, тонких полуфабрикатов (лент, фольги, проволоки), тонких слоев, получающихся в результате химико-термической обработки (азотирования, цианирования и др.), гальванических покрытий, поверхностных слоев металла изменивших свои свойства в результате снятия стружки, давления, трения и отдельных структурных составляющих сплавов.

3.2 Оборудование и материалы

Для испытания на микротвердость применяется прибор ПМТ-3.

Основание 1 (рис. 5) прибора имеет стойку 2, по которой гайкой 3 при ослабленном винте 4 можно перемещать кронштейн 5 с тубусом 6 микроскопа. Кронштейн 5 имеет направляющие, по которым можно перемещать тубус 6. Грубое перемещение тубуса 6 осуществляется вращением винта 7 (макроподача), а малое перемещение – вращением винта 8 (микрородача). Тубус имеет наклонную трубку с окуляром 9 и объектив 10. К тубусу прикреплен механизм нагружения 11 с алмазной пирамидой 12. На основании 1 расположен предметный столик 13, верхнюю часть которого при помощи винтов 14 и 15 можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях (координатное перемещение) и рукояткой 16 поворачивать вокруг оси приблизительно на 180° от одного упора до другого (полуциркуговое перемещение). На столик 13 устанавливается образец 17.

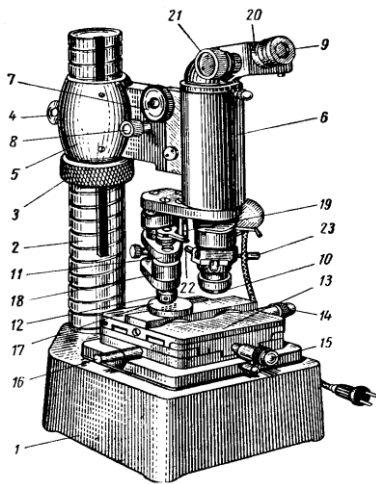


Рис.5 Прибор ПМТ-3

Для нагружения применяются специальные грузы в форме шайб с вырезом весом 2, 5, 10, 20, 50, 100 и 200 г. При испытании один из грузов (шайба 18) устанавливается вырезом на шток нагружающего механизма. Вдавливание алмазной пирамиды 12 в образец 17 под действием груза, находящегося на штоке, осуществляется поворотом рукоятки 19 приблизительно на пол-оборота. Измерение диагонали полученного отпечатка производится окулярным микрометром 20.

Образцы ленты и фольги испытывают без подготовки. При определении твердости отдельных структурных составляющих поверхность образца должна быть подготовлена так же, как для металлографического исследования, т. е. должен быть приготовлен микрошлиф.

3.3 Порядок выполнения работы

1. Установить и закрепить (прижимными лапками или пластилином) образец или шлиф 1 (рис. 6, а) на предметном столике 2 под объективом 3. Столик должен быть повернут в крайнее правое положение до упора.
2. Навести на фокус поверхность образца (шлифа) 1 вращением винтов 7 и 8 (рис. 5) макроподачи и микроподачи.
3. Установить на резкость нити окулярного микрометра вращением глазной линзы окуляра 9 (рис. 5).
4. Вращением барабана 21 установить двойной штрих (перекрестие нитей) окулярного микрометра в центре поля зрения на делении 4 шкалы. Полный оборот барабана (100 малых делений на барабане) соответствует перемещению двойного штриха (перекрестия нитей) на одно деление шкалы.
5. Выбрать на образце 1 (рис. 6, а) место для нанесения отпечатка и подвести его, перемещением столика винтами 14 и 15 (рис. 5), под перекрестие нитей.
6. Окончательно навести на фокус поверхность образца 1 (рис. 6, а) вращением винта 8 микроподачи (рис. 7). Выбрать груз 4 (рис. 6, а) и поместить его на шток нагружающего механизма.
7. Повернуть рукояткой 5 предметный столик вокруг оси 00 в крайнее левое положение до упора (рис. 6, б). Поворачивать нужно осторожно без удара об упор, чтобы не сместить образец.
8. Произвести вдавливание алмазной пирамиды 6, для чего медленно и равномерно, одним пальцем, повернуть на себя рукоятку 7 арретира (рис. 6, в).
9. Дать выдержку 5 – 7 сек.
10. Снять нагрузку, для чего равномерно, одним пальцем, повернуть от себя рукоятку 7 арретира (рис. 6, б).
11. Повернуть рукояткой 5 предметный столик вокруг оси 00 в крайнее правое положение до упора (рис. 6, а). Поворачивать нужно осторожно, без удара об упор, чтобы не сместить образец.
12. Измерить окулярным микрометром диагональ полученного отпечатка.

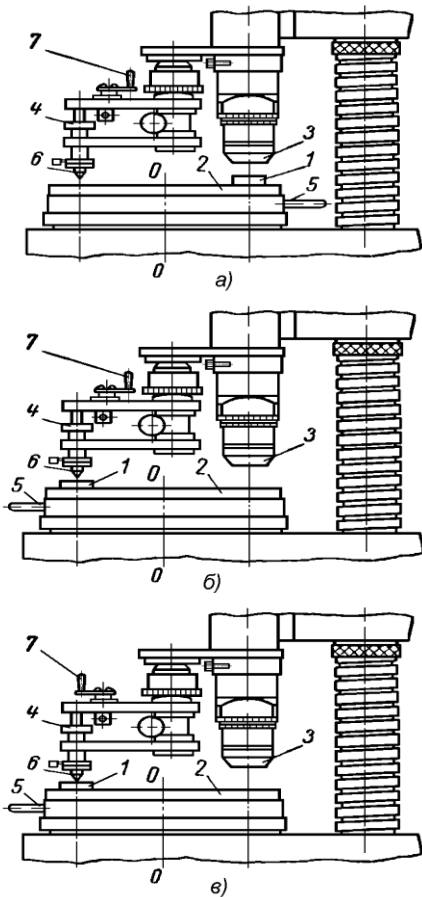
Определение твердости

Если P нагрузку выразить в *граммах*, а d в *микрометрах*, то число твердости H можно определить по формуле:

$$H = 1854 \frac{P}{d^2}, \text{ кг/мм}^2,$$

Чтобы не прибегать к длительным вычислениям твердости по приведенной выше формуле, практически пользуются специальными таблицами, рассчитанными на нагрузки 20, 50 и 100 г.

Например, если указанная выше длина диагонали отпечатка 39 мкм была получена при нагрузке 100 г, то по таблице 2 для данной диагонали отпечатка получаем число твердости 122 кг/мм².



Центрирование прибора

Центрировать прибор необходимо для того, чтобы отпечаток алмазной пирамиды получался при испытании точно в том месте образца, которое выбрано для его нанесения.

Для центрирования прибора необходимо:

1. Двойной штрих (перекрестие нитей) окулярного микрометра установить в центре поля зрения на делении 4 шкалы (рис. 7, а).

2. Выбрать на образце место для нанесения отпечатка и подвести его перемещением столика двумя винтами 14 и 15 (рис. 5) под перекрестие нитей (рис. 7, б).

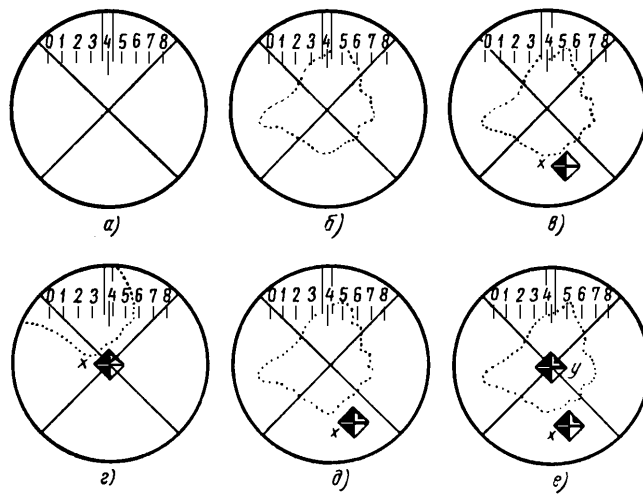
3. Произвести отпечаток (рис. 7, в). Полученный отпечаток x вследствие того, что прибор не центрирован, допустим, расположился не на выбранном месте, а в стороне от перекрестия нитей.

4. Вращением центрировочных винтов 22 и 23 (рис. 5) совместить центр отпечатка x с перекрестием нитей (рис. 7, г).

5. Перемещением столика двумя винтами вновь установить под перекрестие нитей то место образца, на котором желательно сделать отпечаток (рис. 6, д).

6. Нанести отпечаток (рис. 7, е). Нанесенный отпечаток y у расположился на выбранном месте образца и в перекрестии нитей

Рис. 6. Схема испытания на микротвердость на приборе ПМТ-3



a – перекрестие нитей окулярного микрометра установлено в центре поля зрения микроскопа на делении 4; *б* – место желательного нанесения отпечатка на предмете подведено путем перемещения столика двумя винтами под перекрестие нитей; *в* – нанесенный отпечаток *x* расположился в стороне от перекрестия; *г* – отпечаток *x* подведен к перекрестию центрировочными винтами; *д* – установлено прежнее место для испытания на предмете; *е* – вновь сделанный отпечаток *y* расположился в перекрестии нитей и на выбранном месте предмета.

Рис. 7. Центрирование прибора ПМТ-3:

Таблица 2

Числа твердости в $кг/мм.^2$ при испытании алмазной квадратной пирамидой с двугранным углом при вершине 136° для нагрузки P , равной 100 $г$

d мм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	—	—	—	—	7420	5150	3780	2900	2290
10	1850	1530	1290	1100	946	824	724	642	572	514
20	464	420	383	350	322	297	274	254	236	221
30	206	193	181	170	160	151	143	135	128	122
40	116	110	105	100	95,8	91,6	87,6	84,0	80,5	77,2
50	74,2	71,3	68,6	66,0	63,6	61,3	59,1	57,1	55,1	53,3
60	51,5	49,8	47,8	46,7	45,3	43,9	42,6	41,3	40,1	39,0
70	37,8	36,8	35,8	34,8	33,9	33,0	32,1	31,3	30,5	29,7
80	29,0	28,3	27,6	26,9	26,3	25,7	25,1	24,5	24,0	23,4
90	22,9	22,4	21,9	21,4	21,0	20,5	20,1	19,7	19,3	18,9
100	18,5	18,2	17,8	17,5	17,1	16,8	16,5	16,2	15,9	15,6
110	15,3	15,1	14,7	14,5	14,3	14,0	13,8	13,5	13,3	13,1
120	12,9	12,7	12,5	12,3	12,1	11,9	11,7	11,5	11,3	11,1
130	11,0	10,8	10,6	10,5	10,3	10,2	10,0	9,88	9,74	9,60
140	9,46	9,33	9,20	9,07	8,94	8,82	8,70	8,58	8,47	8,35
150	8,24	8,13	8,03	7,92	7,82	7,72	7,62	7,52	7,43	7,34
160	7,24	7,15	7,07	6,98	6,90	6,81	6,73	6,65	6,57	6,49
170	6,42	6,34	6,27	6,20	6,13	6,06	5,99	5,92	5,85	5,79
180	5,72	5,66	5,60	5,54	5,48	5,42	5,36	5,30	5,25	5,19
190	5,14	5,08	5,03	4,98	4,93	4,88	4,83	4,78	4,73	4,68
200	4,64	4,58	4,54	4,50	4,46	4,42	4,38	4,32	4,28	4,24
210	4,20	4,16	4,12	4,08	4,06	4,02	3,98	3,94	3,90	3,86
220	3,83	3,80	3,76	3,74	3,70	3,66	3,64	3,60	3,56	3,54
230	3,50	3,48	3,44	3,42	3,38	3,36	3,34	3,30	3,28	3,24
240	3,22	3,19	3,17	3,14	3,11	3,09	3,06	3,04	3,02	2,99
250	2,97	2,94	2,92	2,90	2,87	2,85	2,83	2,81	2,79	2,76
260	2,74	2,72	2,70	2,68	2,66	2,64	2,62	2,60	2,58	2,56
270	2,54	2,53	2,51	2,49	2,47	2,45	2,43	2,42	2,40	2,38
280	2,36	2,35	2,33	2,32	2,30	2,28	2,27	2,25	2,24	2,22
290	2,21	2,19	2,18	2,16	2,15	2,13	2,12	2,10	2,09	2,07
300	2,06	—	—	—	—	—	—	—	—	—

4 Измерение микротвердости по Кнупу

Индентор по Кнупу представляет собой удлиненную алмазную пирамиду (рисунок 8).

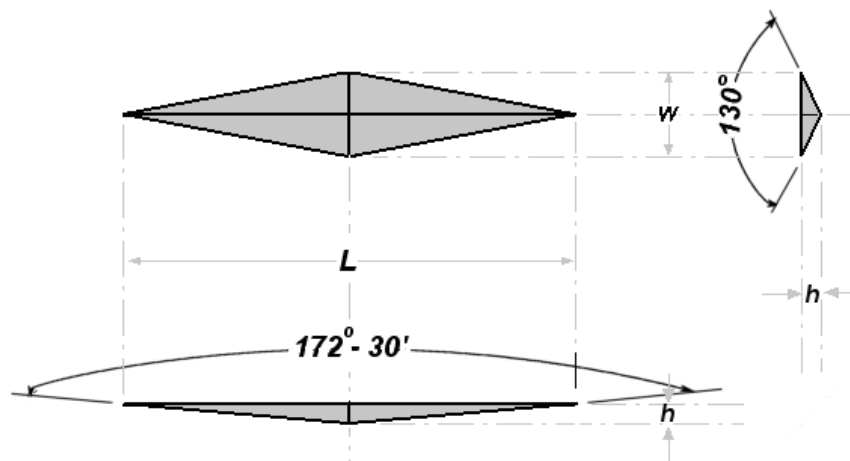


Рис 8 – Геометрия пирамиды Кнуппа

Глубина внедрения алмазной пирамидки рассчитывается, как 1/7 часть от величины диагонали отпечатка или относительно 1/30 длины длинной диагонали. При измерении микротвердости по Кнуппу измеряется только самая длинная диагональ отпечатка.

Процедура для испытания совпадает со стандартом испытаний по Виккерсу, за исключением того, что выполняется в микроскопическом масштабе с более высоким оптическим разрешением. Чем меньше нагрузка прикладываемая к индентору, тем выше требования к оптическому увеличению для регистрации диагонали тестируемого отпечатка. Максимальное возможное увеличение составляет $\times 500$, позволяющее регистрировать размеры объектов с точностью до 0,5 микрон.

Расчет микротвердости по Кнуппу КНН ($\text{кг}/\text{мм}^2$) осуществляется вычислением отношения груза, прикладного к индентору, P (кг) к восстановленной проекции отпечатка A (мм^2).

$$\text{КНН} = P/A = 1480 (P/L^2), \quad (2)$$

где P – прикладываемый груз, кг ; A – восстановленной проекции отпечатка, мм^2 ; L – измеренная длина диагонали отпечатка, мм ; C – постоянный коэффициент учитывающий геометрию индентора по Кнуппу.

5 Измерение твердости по Роквеллу

5.1 Краткие сведения из теории

Сущность метода Роквелла состоит в следующем (рисунок 8): в испытуемый металл 1 вдавливается наконечник 2 под действием двух последовательно прикладываемых нагрузок: предварительной P_0 и основной P_1

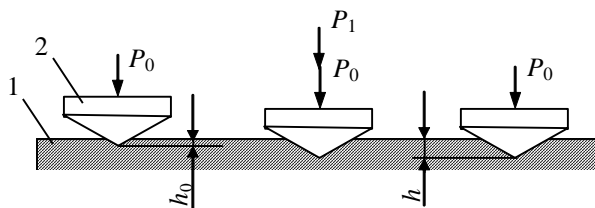


Рисунок 8 – Схема измерения твердости по Роквеллу

Сумма их составляет общую нагрузку P ($P = P_0 + P_1$). Глубина проникновения наконечника характеризует твердость испытуемого материала: чем больше глубина, тем мягче металл и наоборот. В качестве наконечника (индентора) применяют алмазный конус или стальной закаленный шарик.

Измерение твердости производится на специальном приборе Роквелла. Отсчет твердости делают по стрелке индикатора прибора, который имеет циферблат с тремя шкалами: черными A и C и красной B . При вдавливании алмазного конуса твердость отсчитывается по шкале A и C , а шарика – по шкале B .

Твердость, измеренная по Роквеллу, выражается числом твердости по Роквеллу, которое принято обозначать символом: HR с указанием шкалы, по которой был сделан отсчет. При отсчете по шкале A число твердости обозначается символом HRA , по шкале C – символом HRC , а по шкале B – символом HRB . Например, запись $HRC 50$ означает: твердость 50 единиц по Роквеллу, измерена по шкале C ; $HRB 85$ – твердость 85 единиц по Роквеллу, измерена по шкале B ; $HRA 80$ – твердость 80 единиц по Роквеллу, измерена по шкале A .

Числа твердости по Роквеллу HR измеряют в условных единицах и определяют по формулам:

$$HRC = 100 - e \text{ – при измерении по шкале } C; \quad (7)$$

$$HRB = 130 - e \text{ – при измерении по шкале } B. \quad (8)$$

$$HRA = 100 - e \text{ – при измерении по шкале } A. \quad (9)$$

Величина e подсчитывается по формуле:

$$e = (h - h_0) / 0,002, \quad (10)$$

где h – глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием общей нагрузки P , измеренной после снятия основной нагрузки P_1 , при сохранении предварительной нагрузки P_0 ;

h_0 – глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием предварительной нагрузки $P_0 = 10$ кгс;

0,002 – цена деления циферблата индикатора (соответствует углублению шарика или конуса на 0,002 мм).

Конструкция твердомера учитывает зависимости, приведенные в формулах (7)–(9). Поэтому числа твердости по Роквеллу не вычисляются, а списываются со шкалы индикатора.

Достоинства метода Роквелла: высокая производительность, простота обслуживания, точность измерений, сохранение качественной поверхности после испытания.

Условия измерения твердости по Роквеллу регламентированы ИСО 6508–86. Ниже приводятся требования из стандарта, соблюдение которых необходимо при выполнении испытаний.

Требования к наконечникам. Алмазный конус должен иметь угол при вершине $120^{\circ} \pm 30'$ и закругленную вершину с радиусом сферы $0,200 \pm 0,005$ мм. Поверхность конуса на протяжении $0,3$ мм от вершины должна быть тщательно отполирована и свободна от трещин и других поверхностных дефектов, видимых при 30-кратном увеличении.

Шарики должны соответствовать следующим требованиям: материал – термически обработанная сталь с твердостью не менее $HV 850$; (HV – твердость по Виккерсу); диаметр шарика $1,588 \pm 0,001$ мм; шероховатость поверхности – не ниже 12-го класса по ГОСТ 2789–73.

Требования к испытуемому образцу. Поверхность испытываемого образца должна быть ровной, свободной от окалины и других посторонних веществ, без трещин и выбоин.

Не рекомендуется применять метод Роквелла для определения твердости неоднородных по структуре сплавов, например, серого и ковкого чугунов, для испытания криволинейных поверхностей с радиусом кривизны менее 15 мм, а также для испытания изделий, которые под действием нагрузки могут прогнуться и деформироваться.

Требования к установке образца на приборе. Испытуемый образец должен лежать на столе прибора устойчиво. Следует обеспечить перпендикулярность приложения действующего усилия к испытываемой поверхности образца.

Выбор наконечника и нагрузки производится по таблице 1, в которой указаны также пределы измерения для различных шкал.

Шкала *B* служит для испытания металлов средней твердости (менее $HRC 24$) и для испытаний изделий толщиной от $0,8$ до $2,0$ мм (когда испытание методом Бринелля не может быть выполнено по причине продавливания образца).

Шкала *C* применяется для испытания закаленных сталей твердостью до $HRC 67$ и при определении твердости тонких поверхностных слоев толщиной $0,5$ мм и более.

Шкала *A* применяется для испытания сверхтвердых сплавов, имеющих твердость более $HRC 67$ (карбиды вольфрама, твердые сплавы), а также тонкого листового материала, тонких пластинок и очень тонких поверхностных слоев (когда применение больших нагрузок приводит к их продавливанию, что искажает результат испытания). На индикаторе прибора шкала *A* совпадает со шкалой *C*, т.е. практически отсчет производят по шкале *C*.

Таблица 3 – Выбор наконечника и нагрузки для испытания по Роквеллу

Примерная твердость по Виккерсу	Шкала	Форма наконечника	Нагрузка P , кгс	Обозначение твердости	Допускаемые пределы шкалы
60–240	<i>B</i>	Шарик стальной	100	<i>HRB</i>	25–100
240–900	<i>C</i>	Конус алмазный	150	<i>HRC</i>	20–67
390–900	<i>A</i>	Конус алмазный	60	<i>HRA</i>	60–85

Условия проведения испытаний. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков или от края образца до центра отпечатка должно быть не менее 3,0 мм.

Основная нагрузка прикладывается плавно: при холостом ходе под нагрузкой 100 кгс время перемещения грузового рычага должно составлять 3–6 с. Снижается основная нагрузка также плавно через 1–3 с после резкого замедления движения стрелки индикатора.

Отсчет результатов измерения твердости производится в целых делениях шкалы индикатора. На каждом образце должно быть произведено не менее трех измерений. После смены наконечника первые два измерения в расчет не принимаются.

Задание

Вариант 1. Были проведены измерение микротвердости по Виккерсу при нагрузке равной 100 г. Определить глубину внедрения индентера, если микротвердость равнялась 6,5 ГПа.

Вариант 2. Были проведены измерение микротвердости по Кнупу при нагрузке равной 50 г. Определить глубину внедрения индентера, если микротвердость равнялась 4 ГПа.

Вариант 3. Проведены измерения по Бринелю при нагрузке 3000 кгс, определить диаметр используемого шарика, если глубина внедрения 200 мкм, а микротвердость 4,5 ГПа.

Сравнительные значения твердости, измеренные различными методами

P = 30000 Н D = 10 мм t = 10-15 с		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу, МПа	Временное сопротивление, σ_B , МПа (углеродистые стали)
Диаметр отпечатка, мм	Твердость по Бринеллю HB	HRC	HRA	HRB		
1	2	3	4	5	6	7
2,20	780	72	89	-	12240	-
2,30	712	68	85,5	-	10220	-
2,40	653	64	83,5	-	8680	-
2,50	601	60	81,0	-	74,60	-
2,60	555	56	79,0	-	6490	-
2,70	514	52	77,0	-	5870	-
2,80	477	49	75,5	-	5340	1720
2,90	444	46	73,5	-	4730	1600
3,00	415	44	72,5	-	4350	1490
3,10	388	41	71,0	-	4010	1395
3,20	363	39	70,0	-	3800	1305
3,30	341	37	68,0	-	3440	1225
3,40	321	35	68	-	3200	1155
3,50	302	33	67,0	-	3050	1085
3,60	286	30	65,5	-	2850	1030
3,70	269	28	64,5	-	2720	970
3,80	255	26	63,5	-	2550	920
3,90	241	24	62,5	100	2400	870
4,00	228	22	61,5	98	2260	825
4,05	223	21	61,0	97	2210	800
4,10	217	20	60,0	97	2170	780
4,15	212	19	59,5	96	2130	760
4,20	207	18	59,0	95	2090	745
4,25	202	16	58,0	94	2010	720
4,30	196	12	57,0	93	1970	705
4,35	192	11	-	92	1900	690
4,40	187	-	-	91	1860	675
4,45	183	-	-	90	1830	660
4,50	179	-	-	89	1770	640
4,55	174	-	-	87	1740	625
4,60	170	-	-	86	1710	610
4,65	166	-	-	85	1650	600
4,70	163	-	-	84	1620	585
4,75	159	-	-	83	1590	575
4,80	156	-	-	82	1540	560
4,90	149	-	-	80	1490	535
5,00	143	-	-	76	1440	510
5,05	140	-	-	76	-	500
5,10	137	-	-	75	-	495
5,15	134	-	-	74	-	486
5,20	131	-	-	72	-	470
5,25	128	-	-	71	-	462,5
5,30	126	-	-	69	-	450
5,35	124	-	-	69	-	440
5,40	121	-	-	67	-	435
5,45	118	-	-	66	-	425
5,50	116	-	-	65	-	417,5
5,55	114	-	-	64	-	412,5
5,60	112	-	-	62	-	405
5,65	109	-	-	61	-	390
5,70	107	-	-	59	-	385
5,75	105	-	-	58	-	380
5,80	103	-	-	57	-	370
5,85	101	-	-	56	-	365
5,90	99	-	-	54	-	355
5,95	97	-	-	53	-	350
6,00	96	-	-	52	-	345

Контрольные вопросы по методам определения твердости

1. Что называется твердостью металла?
2. Сущность метода определения твердости по Роквеллу.
3. В каких случаях в качестве индентора применяется стальной шарик или алмазный конус?
4. Привести формулы, по которым определяется твердость по шкалам A , C и B .
5. Обозначение числа твердости по Роквеллу при измерении по шкалам A , B , C .
6. Величина предварительной P_0 и общей нагрузки P при определении твердости по Роквеллу по разным шкалам.
7. Угол при вершине алмазного конуса и диаметр шарика, применяемые на приборе Роквелла.
8. Какая связь между твердостью и другими механическими свойствами?
9. Назначение прессы и лупы Бринелля.
10. Какова предельная твердость испытуемого металла при определении твердости по Бринеллю и почему данным методом нельзя испытывать металлы, имеющие твердость больше предельной?
11. Что характеризует твердость металла и какова ее размерность при испытании по Бринеллю?
12. Форма наконечника при определении твердости по Бринеллю.
13. Формула для определения твердости по Бринеллю.
14. Диаметры шариков, мм, применяемых при испытании по Бринеллю.
15. Нагрузка, применяемая при испытании по Бринеллю.
16. Выдержка шарика под нагрузкой при определении HB черных и цветных металлов.
17. Соотношение между нагрузкой P и диаметром шарика D при испытании по Бринеллю черных и цветных металлов.
18. Методика определения твердости по Полюди.
19. Формула для определения твердости методом Полюди.
20. Устройство и работа прибора Полюди.
21. Достоинства, недостатки и область применения метода Полюди.