

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ

Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, возможность их применения в различных конструкциях и при различных условиях работы, является твердость. Испытания на твердость производятся чаще, чем определение других механических характеристик металлов: прочности, относительного удлинения и др.

Твёрдостью материала называют способность оказывать сопротивление механическому проникновению в его поверхностный слой другого твёрдого тела. Для определения твёрдости в поверхность материала с определённой силой вдавливается тело (индентор), выполненное в виде стального шарика, алмазного конуса, пирамиды или иглы. По размерам получаемого на поверхности отпечатка судят о твёрдости материала. В зависимости от способа измерения твёрдости материала, количественно её характеризуют **числом твёрдости по Бринеллю (НВ), Роквеллу (HRC) или Виккерсу (HV)**.

Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия наконечника. Твердость можно измерять вдавливанием индентора (способ вдавливания), ударом или же по отскоку наконечника – шарика. Твердость, определенная царапаньем, характеризует сопротивление разрушению, по отскоку – упругие свойства, вдавливанием сопротивление пластической деформации. Перспективным и высокоточным методом является метод непрерывного вдавливания, при котором записывается диаграмма перемещения, возникающего при внедрении индентора, с одновременной регистрацией усилий. В зависимости от скорости приложения нагрузки на индентор твердость различают статическую (нагрузка прикладывается плавно) и динамическую (нагрузка прикладывается ударом).

Таблица 1. Особенности различных методов измерения твёрдости

Методы	Способ измерения и форма индентора	Нагружение F,Н	Допустимая шероховатость поверхности Ra	Примечание
Бринелля	По диаметру отпечатка от шарика	Статическое 24,5-29430	1,25-2,5	Широко применяемый метод, в частности, для чугуновых деталей.
Роквелла	По глубине вдавливания, алмазный конусный наконечник или шариковый стальной	Статическое 490,3-1373	0,38-2,5	Широко применяемый метод, легко автоматизируется
Супер-Роквелла	По глубине вдавливания, алмазный конус, шарик.	Статическое 147,1-441,3	0,08-0,16	Применяется для нежестких деталей
Виккерса	По глубине вдавливания или по диагонали отпечатка; алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды	Статическое 9,807-980,7	0,02-0,04	Наиболее универсальный - точный метод, широко применяется в том числе и для нежестких деталей
Людвика	По диаметру отпечатка, победитовый конус	Статическое 20000		НЛ не зависит от нагрузки
Шора (Монотрон)	При заданной глубине отпечатка, стальной или алмазный шарик	Статическое	0,63-1,25	
Мартенса	По ширине царапины, алмазный конус или пирамида	Динамическое		Определяется сопротивлению разрыву

Широкое распространение испытаний на твердость объясняется рядом их преимуществ перед другими видами испытаний:

- простота измерений, которые не требуют специального образца и могут быть выполнены непосредственно на проверяемых деталях;
- высокая производительность;

- измерение твердости обычно не влечет за собой разрушения детали, и после измерения ее можно использовать по своему назначению;
- возможность ориентировочно оценить по твердости другие характеристики металла (например предел прочности).

Так, например, зная твердость по Бринеллю (НВ), можно определить предел прочности на растяжение σ_B (временное сопротивление).

$$\sigma_B = k \cdot HB \quad (1.1)$$

где k – коэффициент, зависящий от материала;

$k = 0,34$ – сталь НВ 120 ... 175;

$k = 0,35$ – сталь НВ 175 ... 450;

$k = 0,55$ – медь, латунь и бронза отожженные;

$k = 0,33 \dots 0,36$ – алюминий и его сплавы.

Наибольшее применение получило измерение твердости вдавливанием в испытываемый металл индентора в виде шарика, конуса и пирамиды (соответственно методы Бринелля, Роквелла и Виккерса). В результате вдавливания достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Величина внедрения наконечника в поверхность металла будет тем меньше, чем тверже испытываемый материал.

Таким образом под **твердостью** понимают сопротивление материала местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твердого тела – индентора.

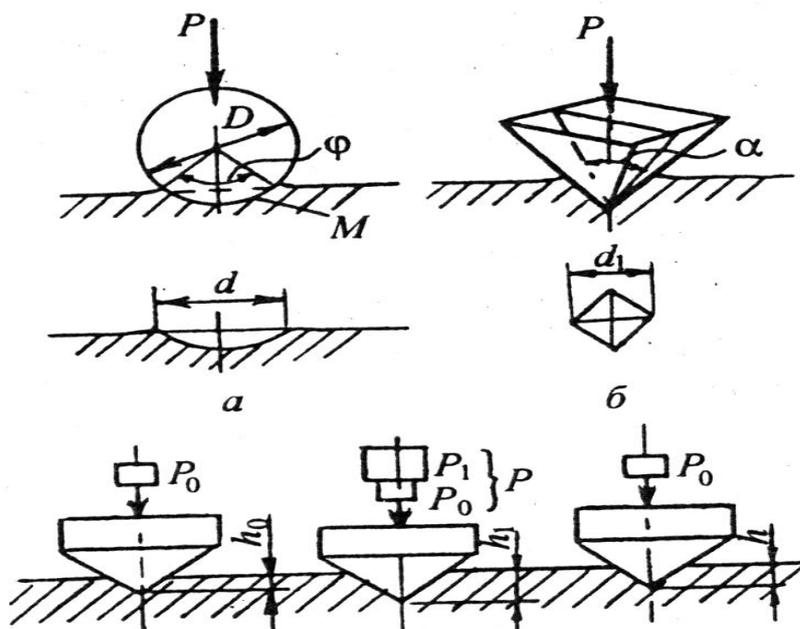


Рис. 1.1 Схемы испытаний на твердость:

а – по Бринеллю, б – по Виккерсу, в – по Роквеллу.

2. КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЁРДОСТИ

2.1 ИЗМЕРЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ

Твердость по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) измеряют вдавливанием в испытываемый образец стального шарика определенного диаметра D под действием заданной нагрузки P в течение определенного времени (Рис. 2.1). В результате вдавливания шарика на поверхности образца получается отпечаток (лунка). Число твердости по Бринеллю, обозначаемое НВ (при применении стального шарика для металлов с твердостью не более 450 единиц) или НВW (при применении шарика из твердого сплава для металлов с твердостью не более 650 единиц), представляет собой отношение нагрузки P к площади поверхности сферического отпечатка F и измеряется в кгс/мм² или МПа:

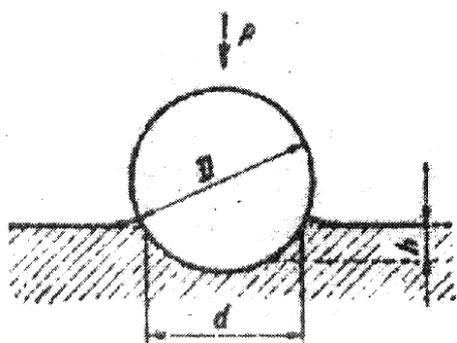


Рис. 2.1. Схема испытаний на твердость по Бринеллю

$$HB = \frac{P}{F} \quad (2.1)$$

Площадь шарового сегмента составит:

$$F = \pi \cdot D \cdot h, \text{ мм}^2, \quad (2.3)$$

где D – диаметр шарика, (мм);

h – глубина отпечатка, (мм).

Так как глубину отпечатка измерить трудно, а проще измерить диаметр отпечатка d , выражают h через диаметр шарика D и отпечатка d :

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}, \text{ (мм)} \quad (2.4)$$

$$\text{Тогда } F = \frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}), \text{ (мм}^2\text{)} \quad (2.5)$$

Число твердости по Бринеллю определяется по формуле:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ (кгс/мм}^2\text{)} \quad (2.6)$$

Для перевода твердости по Бринеллю в единицы СИ необходимо умножить число твердости в кгс/мм² на:

- 9,81, т.е. $HB = 9,81 \cdot HB$ (МПа),
- 0,102 т.е. $HB = 0,102 \cdot HB$ (Н/мм²)

В практике при определении твердости не делают вычислений по формуле (2.6), а пользуются таблицами, составленными для установленных диаметров шариков, отпечатков и нагрузок. Шарика применяют диаметром 1,2; 2,5; 5; 10 мм. Диаметр шарика и нагрузка выбираются в соответствии с толщиной и твердостью образца. При этом для получения одинаковых чисел твердости одного материала при испытании шариками разных диаметров необходимо соблюдать закон подобия между получаемыми диаметрами отпечатков. Поэтому твердость измеряют при постоянном соотношении между величиной нагрузки P и квадратом диаметра шарика D^2 . Это соотношение должно быть различным для металлов разной твердости.

Число твердости по Бринеллю, измеренное при стандартном испытании ($D = 10$ мм, $P = 3000$ кгс), записывается так: HB 350. Если испытания проведены при других условиях, то запись будет иметь следующий вид: HB 5/250/30-200 или 200 HB 5/250/30, что означает – число твердости 200 получено при испытании шариком диаметром 5 мм под нагрузкой 250 кгс и длительности нагрузки 30 с. При испытании на твердость шаром из карбида вольфрама обозначение HB дополняется буквой W с сохранением указанных индексов.

При измерении твердости по методу Бринелля необходимо выполнять следующие условия:

- образцы с твердостью выше HB 450/650 кгс/мм² испытывать запрещается;
- поверхность образца должна быть плоской и очищенной от окалины и других посторонних веществ;
- диаметры отпечатков должны находиться в пределах $0,2D \leq d \leq 0,6D$;
- образцы должны иметь толщину не менее 10 – кратной глубины отпечатка (или менее диаметра шарика);
- расстояние между центрами соседних отпечатков и между центром отпечатка и краем образца должны быть не менее $4d$.
- продолжительность выдержки под нагрузкой должна быть от 10 до 15с для чёрных металлов, для цветных металлов и сплавов – от 10 до 180 с, в зависимости от материала и его твердости

Диаметр отпечатка измеряют при помощи отсчетного микроскопа (лупы Бринелля), на окуляре которого имеется шкала с делениями, соответствующими десятым долям миллиметра. Измерение проводят с точностью до 0,05 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях; для определения твердости следует принимать среднюю из полученных величин.

2.2 ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ

При испытании на твердость по методу Виккерса в поверхность материала вдавливается алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$ (Рис. 1.1). После снятия нагрузки вдавливания измеряется диагональ отпечатка d_1 . Число твердости по Виккерсу HV подсчитывается как отношение нагрузки P к измеренному значению диагонали отпечатка M :

$$HV = \frac{P}{M} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d_1^2} = 1.854 \frac{P}{d_1^2} \quad (2.7)$$

Число твердости по Виккерсу обозначается символом HV с указанием нагрузки P и времени выдержки под нагрузкой, причем размерность числа твердости (кгс/мм²) не ставится. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для сталей 10 – 15 с, а для цветных металлов – 30 с.

При измерении твердости должны быть соблюдены следующие условия:

- плавное возрастание нагрузки до необходимого значения;
- поддержание постоянства приложенной нагрузки в течении установленного времени;
- расстояние между центром отпечатка и краем образца или соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка;
- минимальная толщина образца должна быть для стальных изделий больше диагонали отпечатка в 1,2 раза; для изделий из цветных металлов – в 12,5 раза.

Например, 450 HV_{10/15} означает, что число твердости по Виккерсу 450 получено при P = 10 кгс (98,1 Н), приложенной к алмазной пирамиде в течение 15 с.

Преимущества метода Виккерса по сравнению с методом Бринелля заключается в том, что методом Виккерса можно испытывать материалы более высокой твердости из-за применения алмазной пирамиды.

2.3 ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ

При этом методе индентором является алмазный конус или стальной закаленный шарик. В отличие от измерений по методу Бринелля твердость определяют по глубине отпечатка, а не по его площади. Глубина отпечатка измеряется в самом процессе вдавливания, что значительно упрощает испытания. Нагрузка прилагается последовательно в две стадии (ГОСТ 9013-59): сначала предварительная, обычно равная 10 кгс (для устранения влияния упругой деформации и различной степени шероховатости), а затем основная (Рис. 2.2).

После приложения предварительной нагрузки индикатор, измеряющий глубину отпечатка, устанавливается на нуль. Когда отпечаток получен приложением окончательной нагрузки, основную нагрузку снимают и измеряют остаточную глубину проникновения наконечника t.

Твердомер Роквелла измеряет разность между глубиной отпечатков, полученных от вдавливания наконечника под действием основной и

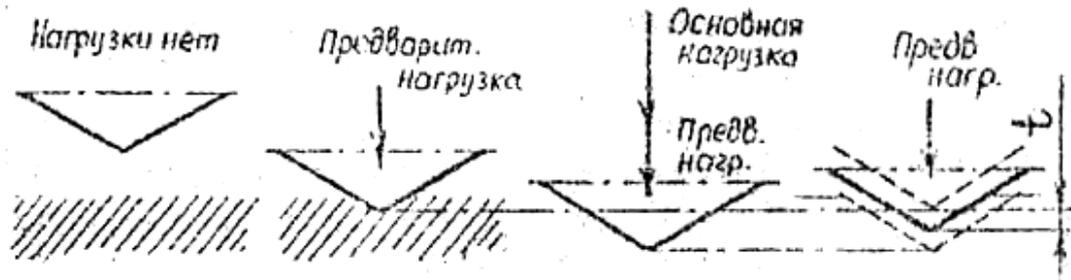


Рис. 2.2. Положение наконечника при определении твердости по Роквеллу: I-IV последовательность нагружения.

предварительной нагрузок. Каждое давление (единица шкалы) индикатора соответствует глубине вдавливания 2 мкм. Однако условное число твердости по Роквеллу (HR) представляет собой не указанную глубину вдавливания t, а величину 100 – t по черной шкале при измерении конусом и величину 130 – t по красной шкале при измерении шариком.

HRA, HRC, HRD – твердость по Роквеллу измеренная при внедрении в поверхность образца алмазного конуса.

HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK - твердость по Роквеллу измеренная при внедрении в поверхность образца стального сферического наконечника.

Числа твердости по Роквеллу не имеют размерности и того физического смысла, который имеют числа твердости по Бринеллю, однако можно найти соотношение между ними с помощью специальных таблиц.

Твердость по методу Роквелла можно измерять:

- алмазным конусом с общей нагрузкой 150 кгс. Твердость измеряется по шкале C и обозначается HRC (например, 65 HRC). Таким образом определяют твердость закаленной и отпущенной сталей, материалов средней твердости, поверхностных слоев толщиной более 0,5 мм;

- алмазным конусом с общей нагрузкой 60 кгс. Твердость измеряется по шкале А, совпадающей со шкалой С, и обозначается HRA. Применяется для оценки твердости очень твердых материалов, тонких поверхностных слоев (0,3 ... 0,5 мм) и тонколистового материала;
- стальным шариком с общей нагрузкой 100 кгс. Твердость обозначается HRB. Так определяют твердость мягкой (отожженной) стали и цветных сплавов.

При измерении твердости на приборе Роквелла необходимо, чтобы на поверхности образца не было окалины, трещин, выбоин и др. Необходимо контролировать перпендикулярность приложения нагрузки и поверхности образца и устойчивость его положения на столике прибора. Расстояние отпечатка должно быть не менее 1,5 мм при вдавливании конуса и не менее 4 мм при вдавливании шарика. Толщина образца должна не менее чем в 10 раз превышать глубину внедрения наконечника после снятия основной нагрузки.

Наконечник алмазный конусный имеет угол при вершине 120°. Наконечник шариковый стальной имеет диаметр 1,588 (шкалы В, F, G) и 3,175 (шкалы Е, Н, К)

Твердость следует измерять не менее 3 раз на одном образце, усредняя полученные результаты.

Преимущество метода Роквелла по сравнению с методом Бринелля:

- возможность проводить испытания высокой твердости путём отсчёта по шкале индикатора без вычисления или пользования специальными таблицами;
- малая повреждаемость поверхности в результате его применения;
- высокая производительность измерения.

2.4 ИСПЫТАНИЕ НА ТВЁРДОСТЬ МЕТОДОМ УДАРНОГО ОТПЕЧАТКА

Метод основан на внедрении в поверхности испытуемого объекта твердосплавного конического индентора (для испытания стали с твердостью ≤ HV850) или стального шара (для испытания стали с твердостью ≤ HV350).

Измерение сравнительной твердости стали по Виккерсу, Бринеллю и пластической твердости осуществляется с помощью переносных твердомеров ударного действия при начальной скорости удара от 1 до 5 м/с.

При измерении сравнительной твердости стали по Виккерсу твердосплавный наконечник в форме двустороннего и одностороннего конуса с углами φ=136° при вершинах внедряют в поверхности испытуемого объекта под действием кратковременной динамической нагрузки, создаваемой ударным механизмом. После снятия индентора с испытуемой поверхности измеряют диаметры отпечатков конуса на поверхностях контрольного бруска d_3 и испытуемого образца d_0 .

Число сравнительной твердости испытуемого объекта по Виккерсу (HV_c) вычисляют по формуле

$$HV_c = HV_э \times \left(\frac{d_3}{d_0} \right)^2 \times \frac{\eta_{кэ}}{\eta_{к0}}, \quad (2.8)$$

где $HV_э$ - среднее значение твердости контрольного бруска по Виккерсу, измеренное посредством статического стационарного прибора; $\eta_{кэ}$ и $\eta_{к0}$ - динамические коэффициенты твердости материалов стального контрольного бруска и испытуемого объекта при ударном внедрении конуса.

При измерении этим методом сравнительной твердости по Бринеллю стальной шарик диаметром D одновременно внедряют в поверхности контролируемого бруска и испытуемого объекта под действием кратковременной нагрузки P_d , создаваемой ударным методом.

После снятия индентора с испытуемой поверхности измеряют диаметры отпечатков шарика на поверхностях контрольного бруска и испытуемого объекта и стального контрольного бруска h_3 .

Число сравнительной твердости испытуемого объекта по Бринеллю (HB_c) вычисляют по формуле

$$HB_c = HB_э \frac{D - \sqrt{D^2 - d_3^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_0^2}} \times \frac{\eta_{шэ}}{\eta_{ш0}}, \quad (2.9)$$

где $HB_э$ - среднее значение твердости контрольного бруска по Бринеллю стального контрольного бруска, измеренное посредством статических стационарных приборов ТШ и ТК; D - диаметр шарика, мм; d_3 - диаметр восстановленного ударного отпечатка на поверхности контрольного бруска, мм; d_0 - диаметр восстановленного ударного отпечатка на поверхности испытуемого образца, мм; $\eta_{шэ}$ и $\eta_{ш0}$ - динамические коэффициенты твердости материалов стального контрольного бруска и испытуемого объекта при ударном внедрении шарика.

Измерение диаметров ударных отпечатков конического индентора на испытуемой поверхности и поверхности контрольного бруска должно осуществляться с помощью отсчётного оптического микроскопа, погрешность которого не должна превышать ±0,01мм на одно наименьшее деление шкалы.

Измерение диаметров ударных отпечатков шарика на испытуемой поверхности и поверхности контрольного бруска должно осуществляться с помощью отсчётного оптического микроскопа, погрешность которого не должна превышать ±0,5 мм на одно наименьшее деление шкалы.

3. КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЁРДОСТИ

3.1 МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТВЁРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПО ШОРУ

Боек определённой массы с алмазным наконечником свободно и вертикально падает с определённой высоты на испытуемую поверхность. Высота отскока бойка принимается за характеристику твёрдости и измеряется в условных единицах.

Масса изделия при измерении твердомерами, установленными непосредственно на изделие, должна быть не менее кг. Образцы, устанавливаемые на столик твердомера, должны иметь массу не менее 0,1 кг и толщину не менее 10 мм.

Прибор для измерения твёрдости должен обеспечивать:

- высоту отскока бойка для 100 единиц твёрдости по Шору $13,6 \pm 0,3$ мм;
- высоту падения бойка $19,0 \pm 0,5$ мм;
- масса бойка с алмазным наконечником должна быть 36 г.

Твёрдость по Шору указывают с округлением до целой единицы. В шкале Шора за 100 единиц принята максимальная твёрдость стабилизированного после закалки на мартенсит образца из углеродистой инструментальной стали, что соответствует высоте падения бойка $13,6 \pm 0,3$ мм.

3.2 АКУСТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЁРДОСТИ ОБРАЗЦА

Во многих случаях применение классических твердомеров для измерения может стать проблематичным. Во-первых, когда контролируемое изделие является крупногабаритным и его нельзя поднести к прибору. Кроме этого, вырезка фрагмента из изделия для последующего измерения твёрдости приводит к порче изделия. Во-вторых – когда требуется достаточно высокая производительность контроля.

Чтобы избежать тех недостатков, которые присущи классическим методам твердометрии, были разработаны твердомеры, использующие динамический и акустический методы.

Этот метод основан на измерении относительных изменений механического импеданса колебательной системы преобразователя в зависимости от механических свойств поверхности образца.

Акустический преобразователь представляет собой стержень из магнитоэлектрического материала (например, никеля), на конце которого укреплен индентор в виде алмазной призмы. К стержню прикреплен пьезоэлемент, возбуждающий в преобразователе продольные упругие колебания частотой 30-40 кГц. Стержень с индентором прижимают к контролируемому объекту с постоянной силой. При этом индентор внедряется в поверхность изделия тем глубже, чем меньше твёрдость его материала. Площадь зоны соприкосновения индентора с изделием с уменьшением твёрдости растёт, а модуль упругого сопротивления увеличивается.

Изменение импеданса определяют по изменению собственной частоты нагруженного преобразователя, которую измеряют частотомером. Шкалу индикатора градуируют в единицах твёрдости по Роквеллу.

Принцип работы динамических твердомеров основан на измерении отношения скоростей индентора при падении и отскоке его от поверхности контролируемого изделия. Отношение скоростей перемещения индентора при отскоке и падении характеризуют твёрдость контролируемого изделия.

Преобразователь включает в себя механическую систему, обеспечивающую перемещение индентора относительно поверхности контролируемого материала, и электрическую катушку. Во взведённом положении преобразователя цапга спускового механизма удерживает индентор. При нажатии спусковой кнопки цапга разжимается и индентор под действием предварительно сжатой пружины сбрасывается на контролируемую поверхность. На конце индентора расположен твердосплавный шарик, непосредственно контактирующий с испытуемым материалом. Внутри индентора находится постоянный магнит. При пересечении магнитным полем витков катушки в последней наводится э.д.с., пропорциональная скорости движения индентора.

Измеряемая твёрдость является функцией отношения сигналов U_1 и U_2 :

$$H = f\{U_1/U_2\}, \quad (3.1)$$

где U_1 - скорость сброса; U_2 - скорость отскока.