

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ТВЕРДОСТИ

Студенты: гр.10111123 И. Д. Ветров, гр.10107223 Д. Г. Елогвенко

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Реут Л.Е.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

В некоторых случаях для оценки прочности и пластичности материала используют косвенный способ определения его прочностных характеристик, например, через измерение *твёрдости*.

ТВЕРДОСТЬ – это способность материала сопротивляться механическому проникновению в его поверхность другого, более твёрдого тела (индентора), не испытывающего остаточных деформаций.

Измерение твердости является одним из самых распространенных и доступных методов механических испытаний, широко используемых в заводской практике и при выполнении научных исследований как способ оценки качества материалов. Испытания на твердость получили широкое применение благодаря простоте, скорости измерения, портативности оборудования, возможности осуществлять текущий контроль изделий в процессе производства и эксплуатации, не влияя на их работоспособность и, что особенно ценно, относятся к неразрушающим методам механических испытаний. Путем измерения твердости эту величину можно оценивать как характеристику, косвенно отражающую механические свойства материала. Это позволяет контролировать различные производственные объекты и выявлять в них локальные пластически деформированные зоны, являющиеся потенциальными очагами трещинообразования и разрушения, контролировать изменение свойств элементов, эксплуатируемых в течение длительного времени, а также качества термической обработки, вызывающей изменение свойств в поверхностном слое.

Испытания на твердость очень разнообразны и отличаются друг от друга по форме индентора, условиям приложения нагрузки, способам расчета величины твердости, временем нагружения и т. д. В зависимости от этих факторов твердость может характеризовать упругие и упруго-пластические свойства, сопротивление деформациям, сопротивление разрушению.

Оценивается твердость так называемыми *числами твердости*, которые связаны с показателями прочности и пластичности материала и являются производными характеристиками его основных механических свойств – предела прочности, предела текучести, модуля упругости и др. Числа твердости зависят от конкретных условий испытаний и методов вычисления, поэтому для одного и того же материала они могут быть различны как по величине, так и по размерности. Пересчет чисел твердости осуществляется с помощью специальных таблиц, номограмм и эмпирических формул.

В настоящее время существуют около 30 видов испытаний на твердость, которые по скорости приложения нагрузки и способу измерения сопротивления вдавливанию индентора подразделяют:

- ★ на *статические*, при которых нагрузку к индентору прикладывают плавно и постепенно, а время выдержки под нагрузкой регламентируется стандартами на соответствующие методы;

- ★ *динамические*, при которых индентор действует на образец с определенной кинетической энергией, затрачиваемой на формирование отпечатка и упругую отдачу, и поэтому динамическую твердость часто называют твердостью материала при ударе. Твердость при ударе характеризует сопротивление внедрению не только на поверхности образца, но и в некотором объеме материала;

- ★ *кинетические*, основанные на непрерывной регистрации процесса вдавливания индентора с записью диаграммы «нагрузка на индентор – глубина внедрения индентора».

По принципу приложения нагрузки методы определения твердости подразделяются на способы *вдавливания, отскока, царапания и резания*.

- ★ Способы *вдавливания* являются наиболее распространенными. Твердость в этом случае определяется как сопротивление, которое оказывает испытываемое тело внедрению более твердого индентора и отражает преимущественно сопротивление поверхностных слоев материала пластической деформации. К таким методам относятся измерение твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, а также метод измерения микротвердости. Во всех случаях контакт осуществляется вдавливанием индентора определенной формы и размеров, в результате чего реализуется состояние всестороннего сжатия, что позволяет производить оценку твердости практически любых, в том числе и очень хрупких, материалов.

- ★ Способы *отскока* основаны на измерении твердости по высоте

отскока бойка, падающего на испытуемую поверхность. Твердость при этом отражает преимущественно сопротивление упругой деформации. Измерение твердости методом *отскока* широко применяют для контроля качества прокатных валков, больших изделий и конструкций с использованием переносных приборов.

★ Способами *царапания* и *резания* твердость определяется соответственно как сопротивление материала разрушению.

Определение твердости по Бринеллю

Метод измерения твердости по Бринеллю заключается в статическом вдавливании в испытуемую поверхность усилием F , приложенным перпендикулярно поверхности образца, индентора в форме *шарика* диаметром D , выполненного из стали или твердого сплава, и измерении диаметра отпечатка d после снятия силы (рисунок 1).

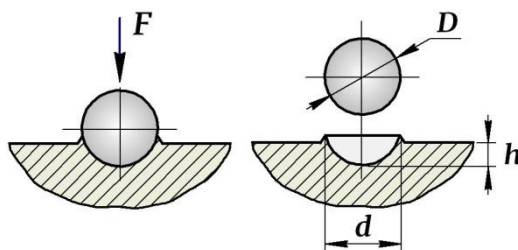


Рисунок 1. – Определение твердости по Бринеллю

Число твердости по Бринеллю обозначается НВ и определяется как отношение силы вдавливания F к площади сферического отпечатка (лунки) A :

$$\text{НВ} = \frac{F}{A} \text{ Н/мм.} \quad (1)$$

Площадь отпечатка (шарового сегмента) определяется как

$$A = \pi D h, \quad (2)$$

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

Тогда, в зависимости от метода расчета, площадь сферической лунки может быть определена:

★ *по методу невосстановленного отпечатка* – как площадь внедрённой в материал части индентора, вычисляемая путем замера глубины внедрения индентора h , мм ;

★ *методу восстановленного отпечатка* – как площадь сферического отпечатка после снятия нагрузки и его упругого восстановления, вычисляемая путем замера диаметра отпечатка d , мм. Этот способ является более предпочтительным и, так как диаметр d и высота h шарового сегмента геометрически связаны соотношением

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}, \quad (3)$$

согласно формуле (1) и значениям (2) и (3), твердость по Бринеллю вычисляется как

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

Когда твердость испытуемого металла соизмерима с твердостью индентора, происходит деформация (смятие) шарика, вследствие чего искажается форма отпечатка и нарушается точность результатов. Поэтому для данного метода вводится ограничение – верхний предел измерения твердости по Бринеллю не должен превышать величину 450 HB, а значит, метод пригоден только для относительно мягких материалов. Для испытаний более твердых материалов используют шарики из твердых сплавов на основе карбида вольфрама (WC), что позволяет повысить верхний предел измерения твердости до значений 740 HBW. Ограничением метода Бринелля является также невозможность измерения твердости тонких листов, лент и тонких поверхностных слоев.

Твердость по Бринеллю является косвенной характеристикой прочности, и прямой связи твердости HB с пределом текучести или пределом прочности материала не существует. Однако на практике часто используют эмпирическую линейную зависимость $\sigma = k HB$, где коэффициент k определяется на основе сравнительных испытаний для конкретных классов металлов и в зависимости от вида металла и его состояния принимается в

пределах $k = 0,15 - 0,5$.

Основной недостаток метода заключается в том, что твердость по Бринеллю зависит от нагрузки. Поскольку шаровой индентор не обеспечивает геометрического подобия сферических отпечатков, т. е. изменение глубины вдавливания непропорционально изменению глубины отпечатка (3), а значит, и площади отпечатка, для каждого размера шарика необходимо подбирать соответствующее регламентированное усилие, что создает неоднозначность при сравнении чисел твердости НВ для разных материалов.

Преимуществами метода Бринелля являются его простота и отсутствие необходимости специальной подготовки поверхности для проведения испытаний, что является удобным для его применения в цеховых условиях.

Определение твердости по Виккерсу

Измерение твердости по Виккерсу основано на вдавливании в образец усилием F , приложенным в течение определенного времени, алмазного индентора в форме правильной четырехгранной пирамиды с углами между гранями $\alpha = 136^\circ$ и измерении диагоналей d_1 и d_2 отпечатка, оставшегося на поверхности образца после снятия нагрузки и соответствующего глубине погружения индентора (рисунок 2).

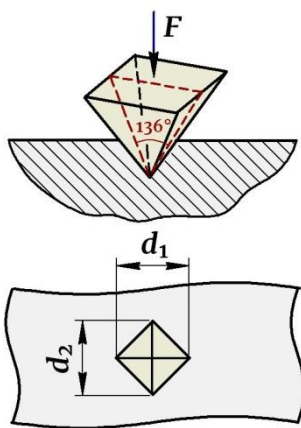


Рисунок 2. – Определение твердости по Виккерсу

При определении твердости по Виккерсу индентор имеет один размер, но варьируется сила: 50–1000 Н. Применение алмазной пирамиды обеспечивает геометрическое подобие пирамидальных отпечатков при

любой нагрузке, т. е. соотношение глубины и размера отпечатка при максимальном вдавливании не зависит от приложенного усилия. Это позволяет достаточно строго сравнивать твердость разных металлов и результаты испытаний при разных нагрузках. Ввиду того, что геометрические размеры индентора известны и строго регламентированы, вместо глубины погружения определяют площадь отпечатка в поверхностном слое испытуемого материала. Твердость по Виккерсу обозначается HV и определяется делением силы на площадь боковой поверхности пирамидального отпечатка:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2F \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2}, \text{ Н/мм}^2,$$

где $d = (d_1 + d_2)/2$ — среднеарифметическая величина обеих диагоналей, замеренных с помощью микроскопа, входящего в прибор Виккерса.

Достоинство метода Виккерса заключается в возможности измерения твердости мягких, а также особо твердых материалов. Благодаря применению малых нагрузок этим методом можно измерять твердость очень тонких изделий, изделий малых размеров, а также твердость поверхностных слоев. Метод вдавливания алмазной пирамиды является самым точным и универсальным в технике измерения твердости. Вследствие большого угла в вершине наконечника пирамиды, даже при малой глубине ее внедрения, диагональ отпечатка имеет большую величину, что определяет высокую точность и чувствительность метода.

Определение твердости по Роквеллу

Измерение твердости по Роквеллу предназначено для неразрушающего контроля твердости наименее пластичных материалов - сталей и их сплавов. Метод основан на фиксации прямого измерения глубины проникновения твердого тела измерительной головки (индентора) в материал образца. Глубина отпечатка характеризует способность материала сопротивляться внешнему воздействию без образования валика из вытесненного металла вокруг индентора. Твердость по Роквеллу (HR) — безразмерная величина, которая выражается в условных единицах до 100, где единица твердости соответствует осевому перемещению индентора на глубину 0,002 мм. Чем глубже внедрение индентора, тем меньше твердость.

В качестве индентора применяют алмазный конус с углом 120° и радиусом при вершине 0,2 мм или закаленный шарик диаметром 1,588 мм. Универсальность метода заключается в наличии трех шкал твердости, которые проградуированы под соответствующую нагрузку: шкала *A* (HRA) используется для измерения твердости тонких поверхностных слоев и очень твердых материалов; по шкале *C* (HRC) замеряют высокую твердость, превышающую 450 HB; шкала *B* (HRB) предназначена для мягких материалов.

Техника проведения эксперимента заключается во вдавливании наконечника (алмазного конуса или закаленного шарика) в образец двумя последовательными нагрузками - *предварительной* $F_0 = 100$ Н и *основной* $F_{\text{осн}}$, принимаемой для шкал *A, B, C* соответственно равной 600, 1000 и 1500, 1000 и 1500 Н. Необходимость предварительной нагрузки заключается в том, что она обеспечивает плотное прилегание наконечника к образцу и исключает влияние на результаты испытаний вибраций, шероховатости, локальных повреждений поверхностного слоя и т. п.

После удерживании образца в течение 3-5 с под действием суммарной силы $F_0 + F_{\text{осн}}$, в результате действия которой индентор внедряется на максимальную глубину, производя пластическую и упругую деформации, основная сила $F_{\text{осн}}$ сбрасывается, а предварительная F_0 сохраняется (рисунок 3).

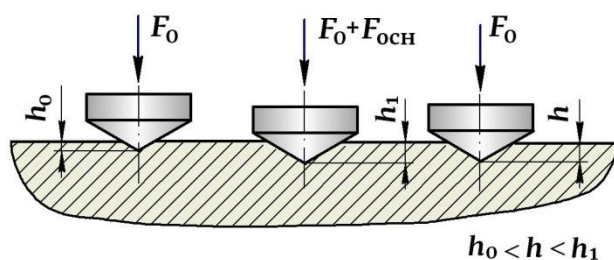


Рисунок 3. – Техника определения твердости по Роквеллу

Вследствие частичного упругого восстановления образца индентор поднимается вверх, но не достигает значения h_0 – глубины внедрения от предварительной силы F_0 и занимает положение, соответствующее остаточной глубине h , которая и характеризует твердость металла. Таким образом, твердость по Роквеллу отражает степень упругого восстановления отпечатка после снятия нагрузки, т. е. число твердости по Роквеллу определяет сопротивление упругим или малым пластическим деформациям.

Преимуществом метода Роквелла является быстрота измерения, так как здесь, в отличие от определения твердости по Бринеллю и Виккерсу, отпадает необходимости выполнять раздельное проведение операций вдавливания и измерения отпечатка. Однако недостаток метода Роквелла заключается в том, что для проведения эксперимента необходима тщательная подготовка поверхности — ее очистка и шлифование.

Определение микротвердости

Метод определения микротвердости предназначен для оценки твердости очень малых (микроскопических) объемов материала, и его применяют для определения твердости отдельных фаз и структурных составляющих сплавов, тонких поверхностных слоев и покрытий толщиной в сотые доли миллиметра, а также для измерения твердости мелких деталей, тонкой проволоки, ленты и т. д.

Определение микротвердости основано на вдавливании в испытуемый образец алмазных наконечников, имеющих разные формы и размеры, указанные в обозначении микротвердости: четырехгранная пирамида с квадратным основанием $H_{\square}$, с ромбическим основанием $H_{\diamond}$, трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника H_{∇} , биглиндрический наконечник $H_{\emptyset}$.

Микротвердость определяется отношением силы вдавливания к площади поверхности полученного отпечатка и вычисляется по формулам, соответствующим форме применяемого индентора. При определении микротвердости небольшие нагрузки и малые размеры индентора требуют тщательной подготовки поверхности образца – шлифования, полирования, а при работе с металлографическими структурами – изготовления шлифов и их протравки реактивами для выявления структуры.

Определение твердости по Шору

Этот способ относится к динамическим методам и заключается в определении твердости материала по величине отскока бойка после его удара об исследуемую поверхность. Такой способ измерения твердости принципиально отличается от вышеописанных – здесь твердость оценивают по величине упругой, а не пластической деформации.

При *горизонтально расположенной поверхности* образца удар наносится свободно падающим с заданной высоты бойком с алмазным индентором на конце. Кинетическая энергия падающего бойка частично расходуется на образование пластически деформированной лунки, частично переходит в потенциальную энергию упругой деформации, под действием которой боек отскакивает на определенную высоту. Высота отскока всегда меньше высоты падения, и чем меньше кинетической энергии затрачено на пластическую деформацию, тем больше будет высота отскока, которая и принимается за характеристику твердости.

При *вертикально расположенной поверхности* испытуемого образца для нанесения удара используют маятниковый копер, в ударном молоте которого в качестве индентора установлен стальной шарик. Таким способом величина твердости определяется по величине угла отскока маятника.

Метод измерения твердости по Шору не является точным, так как высота отскока бойка зависит от многих факторов - толщины металла, степени шероховатости его поверхности и структуры, от формы и массы бойка, а также массы образца. Если масса образца мала, часть кинетической энергии бойка идет на образование колебаний образца, в результате чего высота отскока бойка уменьшается. Однако этот метод, вследствие его простоты и оперативности, часто используется в заводской практике.

В завершение вопроса следует сказать, что при сопоставлении значений твердости, полученных разными методами, приводимые в литературных источниках таблицы и зависимости являются чисто эмпирическими. Сопоставительный перевод значений твердости не имеет физического смысла, так как при вдавливании различных по форме и размерам инденторов и с разной нагрузкой твердость определяется при совершенно различных напряженных состояниях материала.

Литература

1. Дарков, А. В. Сопротивление материалов: учебник / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро – М.: Высшая школа, 1975. – 742 с.
2. Реут, Л.Е. Экспериментальное изучение свойств материалов. [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие для студентов машиностроительных специальностей / Л. Е. Реут; Белорусский национальный технический университет, кафедра «Теоретическая механика и механика материалов». – Минск: БНТУ, 2022. – Режим доступа <https://rep.bntu.by/handle/data/112142>.