

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емец Валерий Сергеевич
Должность: Директор филиала
Дата подписания: 28.05.2026 14:54:01
Уникальный программный ключ:
f2b8a1573c931f1098cfe699d1debd94fcff35d7

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Рязанский институт (филиал)

федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский политехнический университет»

Кафедра «Механико-технологические дисциплины»

Аверин Н.В., Гнидо В.Ф., Иванюк А.В.

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ**

Учебно-методическое пособие

Рязань

2019

УДК 621.3.01

ББК 31.2

Г 56

Г 56 Гнидо, В.Ф. Материаловедение. Измерение твердости металлов: учебно–методическое пособие /Аверин Н.В., Гнидо В.Ф., Иванюк, А.В. – Рязань: Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2019. -35 с.

Определение твердости металлов. Учебно-методическое пособие по дисциплине «Материаловедение» для студентов направления 15.03.05 всех форм обучения. Рязань: Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета 2019.

Дана краткая характеристика методов измерения твердости металлов, области их применения, изложен способ измерения твердости металлов методами Бринелля, Роквелла и приведена методика выполнения лабораторных работ.

Печатается по решению методического совета Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета.

УДК 621.3.01

ББК 31.2

Г 56

© Рязанский институт (филиал) Московского
политехнического университета, 2019

© Аверин Н.В. 2019

© Гнидо В. Ф., 2019

© Иванюк А.В. 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Краткие теоретические сведения.....	5
1 Качество металлов и его свойства.....	5
1.1 Качество металлов.....	5
1.2 Основные свойства металлов.....	7
1.3 Влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали.....	11
2 Твердость. Определение твердости.....	12
2.1 Твердость.....	12
2.2 Определение твердости по Бринеллю.....	13
2.3 Определение твердости по Роквеллу.....	14
2.4 Современные методы экспресс-анализа твёрдости металлов.....	15
2.4.1 Определение твёрдости. Основные методы экспресс-анализа.....	15
2.4.2 Ультразвуковой резонансный метод анализа (метод <i>UCI</i>).....	16
2.4.2 Метод отскока (Метод Либа).....	17
3 Экспериментальное исследование твердости металлов.....	20
3.1 Лабораторная работа «Определение твердости по Бринеллю».....	20
3.2 Лабораторная работа «Измерение твердости твердомером МЕД-УД»..	26
Список использованных источников.....	34

Введение

Материаловедение – наука о связях между составом, строением и свойствами материалов и закономерностях их изменений при внешних физико-химических воздействиях.

Все материалы, по химической основе, делят на 2 основные группы – металлические и неметаллические. К металлическим материалам относят металлы и их сплавы. Металлы составляют более 2/3 всех известных химических элементов.

В свою очередь, металлические материалы делят на черные и цветные. К черным относят железо и сплавы на его основе – стали и чугуны. Все остальные металлы относят к цветным.

Черные металлы отличает темно-серый цвет, большой удельный вес (кроме щелочноземельных), они имеют высокую температуру плавления, относительно высокую твердость. Кроме того, многие из них обладают полиморфизмом - способностью существования одного металла в нескольких кристаллических формах: атомы перестраиваются таким образом, что образуется решетка другого типа. Для обозначения новых структур используются буквы α , β , γ и т.д.

Цветные металлы обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления. Данные металлы обычно имеют красный, желтый или белый цвет, не обладают полиморфизмом.

Практическое значение различных металлов неодинаково. Наибольшее применение в технике приобрели черные металлы. На основе железа изготавливают более 90 % всей металлоконструкции. Однако, цветные металлы обладают целым рядом ценных физико-химических свойств, которые делают их незаменимыми. В промышленности, кроме металлических, значительное место занимают различные неметаллические материалы – пластмассы, керамика, резины и т.д. Но использование их в промышленности невелико (до 10 %).

В данном методическом пособии будут рассмотрены основные свойства металлов, влияние их структуры на твердость металлов, методы определения твердости. Для закрепления учебного материала студенты выполняют две лабораторные работы.

1 Краткие теоретические сведения

1 Качество металлов и его свойства

1.1 Качество металлов

Качеством материала называется совокупность его свойств, удовлетворяющих определенные потребности в соответствии с назначением. Уровень качества определяется соответствующими показателями, представляющими собой количественную характеристику одного или нескольких свойств материалов, которые определяют их качество применительно к конкретным условиям изготовления и использования. По количеству характеризующих свойств показатели качества подразделяются на единичные и комплексные. Единичный показатель качества характеризуется только одним свойством (например, твердость стали). Комплексный показатель характеризуется несколькими свойствами продукции. При этом продукция считается качественной только в том случае, если весь комплекс оцениваемых свойств удовлетворяет установленным требованиям качества. Примером комплексного показателя качества стали могут служить оценка химического состава, механических свойств, микро- и макроструктуры. Комплексные показатели качества устанавливаются государственными стандартами.

Методы контроля качества могут быть самые разнообразные: визуальный осмотр и инструментальный контроль. По стадии определения качества различают контроль предварительный, промежуточный и окончательный. При предварительном контроле оценивается качество исходного сырья, а при промежуточном – соблюдение установленного технологического процесса. Окончательный контроль определяет качество готовой продукции, её годность и соответствие стандартам. годной считается продукция, полностью отвечающая

требованиям стандартов и технических условий. Продукция, имеющая дефекты и отклонения от стандартов, считается браком.

Качество металла определяется, главным образом, его свойствами, химическим составом и структурой. При этом свойства материала зависят от структуры, которая, в свою очередь, зависит от химического состава.

При оценке качества определяют свойства, состав, и оценивают структуру материала.

Существуют различные методы изучения структуры материалов. С помощью макроанализа изучают структуру, видимые невооруженным глазом или при небольшом увеличении с помощью лупы. Макроанализ позволяет выявить различные особенности строения и дефекты (трещины, пористость, раковины и др.).

Микроанализом называют изучение структуры с помощью оптического микроскопа при увеличении до 3 000 раз. Электронный микроскоп позволяет изучать структуру при увеличении до 25 000 раз.

Рентгеновский анализ применяют для выявления внутренних дефектов. Он основан на том, что рентгеновские лучи, проходящие через материал и через дефекты, ослабляются в разной степени. Глубина проникновения рентгеновских лучей в сталь составляет 80 мм. Эту же физическую основу имеет просвечивание гамма-лучами, но они способны проникать на большую глубину (для стали – до 300 мм).

Просвечивание радиолучами сантиметрового и миллиметрового диапазонов позволяет обнаружить дефекты в поверхностном слое неметаллических материалов, т.к. проникающая способность радиоволн в металлических материалах невелика.

Магнитная дефектоскопия позволяет выявить дефекты в поверхностном слое (до 2 мм) металлических материалов, обладающих магнитными свойствами и основана на искажении магнитного поля в местах дефектов.

Ультразвуковая дефектоскопия позволяет осуществлять эффективный контроль качества на большой глубине. Она основана на том, что при наличии

дефектов интенсивность проходящего через материал ультразвука меняется. Капиллярная дефектоскопия служит для выявления невидимых глазом тонких трещин. Она использует эффект заполнения этих трещин легкосмачивающими жидкостями материалы.

1.2 Основные свойства металлов

При конструировании деталей машины выбор материалов для них производится с учетом условий эксплуатации, технологичности материала, времени безотказной работы, а так же с точки зрения экономической целесообразности. Подбор материала для обеспечения данных условий и требований осуществляется по его механическим, физическим, химическим и эксплуатационным характеристикам.

К эксплуатационным свойствам относятся: износостойкость, коррозионная стойкость, жаропрочность, жаростойкость и др. Они проявляются в процессе эксплуатации. Это так называемые стали и сплавы с особыми свойствами. Например, нержавеющие стали (коррозионностойкие), жаропрочные стали (на основе титана), инструментальные стали и др.

Химические свойства проявляются через химическую активность металла. Взаимодействие его со средой в процессе производства, обработки и эксплуатации приводит к образованию примесей, которые влияют на механические и другие свойства металлов. Особенно вредно влияние кислорода. В общем, при взаимодействии металла с окружающей средой происходит поверхностное охлаждение металла, насыщение его газом, образование различных химических соединений (сернистые соединения, карбиды) и другие вещества.

Основными механическими свойствами металлов являются: прочность, деформация, упругость, твердость, вязкость, пластичность, хрупкость.

Прочность – способность материала сопротивляться разрушению, а также необратимому разрушению формы (пластическая деформация) при действии внешней нагрузки. Прочность зависит не только от самого материала, но и от

вида напряженного состояния (растяжения, сжатия, изгиба и др.), от условий эксплуатации, воздействия окружающей среды. Повышение прочности – важнейшая задача в технике. Она решается термической и механической обработкой, введением легирующих добавок в сплавы, применением армирования и композитных материалов.

Деформация – изменение взаимного расположения различных частей твердого тела, при котором меняются расстояния между ними в результате внешнего воздействия. Деформация является упругой, если она исчезает после снятия воздействия, и называется пластической, если она полностью не исчезнет. Деформации подразделяются на растяжение, сжатие, изгиб, кручение.

Упругость – свойство твердого тела восстанавливать форму и объем после прекращения действия внешних сил. Количественная характеристика упругих свойств материалов – модуль упругости. Упругость обусловлена взаимодействием между атомами и молекулами при их тепловом движении.

Твердость – свойство материала сопротивляться внедрению в него другого более твердого тела, не получающего остаточной деформации при местном контактном воздействии.

Вязкость – свойство материала сопротивляться разрушению под действием динамических нагрузок.

Пластичность – способность материалов изменять свои размеры и форму под действием внешних сил без разрушения.

Хрупкость – свойство тел разрушаться после незначительной пластической деформации.

Из металлов сталь является основой современного машиностроения и по объему производства превосходит все другие сплавы, вместе взятые. Сталь является многокомпонентным сплавом, содержащим железо и ряд постоянных примесей: углерод (С), марганец (Mn), кремний (Si), сера (S), фосфор (P), азот (N), кислород (O), водород (H) и другие, влияющие на ее свойства.

Ее свойства широко изменяются в зависимости от содержания углерода и других элементов, вводимых в качестве легирующих составляющих.

Все легирующие элементы в той или иной степени улучшают механические свойства стали. Следует учитывать, что если сталь одновременно легирована несколькими элементами, то ее свойства будут зависеть от влияния каждого элемента в отдельности.

Хром повышает твердость, прочность, износостойчивость и способствует образованию мелкозернистой структуры стали. При содержании хрома до 1,5 % вязкость стали не уменьшается, при большом количестве хрома снижается пластичность. Хром увеличивает прокаливаемость стали, повышает коррозионную стойкость.

Никель повышает прочность, увеличивает пластичность и вязкость стали, делает ее менее склонной к хладноломкости. При наличии никеля структура стали в сильной степени измельчается и увеличивается глубина закалки. Наиболее важным влиянием никеля является увеличение вязкости стали. Никелем легируют конструкционную сталь.

Кремний повышает прочность, твердость и, особо сильно, упругость стали. Кремний является хорошим раскислителем стали. Наиболее ценна способность кремния вместе с марганцем улучшать механические свойства стали.

Молибден повышает прочность стали, глубину прокаливаемости, красностойкость. В конструкционные стали его вводят для устранения отпускной хрупкости, в инструментальные – для повышения красностойкости.

Вольфрам повышает твердость и прочность, устраняет отпускную хрупкость. Применяется в инструментальных сталях для повышения их красностойкости, а так же в конструкционных, повышая их прочность и вязкость.

Титан улучшает механические свойства стали, повышает твердость и прочность. Как легирующий элемент применяется в конструкционных сталях и в сталях специального назначения.

Марганец повышает твердость, прочность, увеличивает прокаливаемость, уменьшает вязкость, снижает вредное влияние серы. Применяется обычно в комбинации с другими элементами в целях увеличения прокаливаемости.

Таким образом, разностороннее влияние легирующих элементов дает возможность получить легированные стали с широким спектром свойств и широким диапазоном применения.

На твердость стали сильно влияет структура. Основными структурами стали являются аустенит, феррит, перлит и цементит.

Аустенит – представляет собой твердый раствор внедрения углерода в γ -железо (Fe_γ).

Феррит – это твердый раствор внедрения углерода в α -железе (Fe_α).

Цементит – это карбид железа Fe_3C , содержит 6,67 % углерода, отличается повышенной твердостью. Цементит в сталях выделяется в виде избыточной вторичной фазы вследствие понижения растворимости углерода в аустените и феррите. Выделение его происходит путем диффузии к границам зерна, при этом вокруг зерна формируется оболочка или сетка.

Перлит – структура, образуется в результате распада аустенита на мелкодисперсную смесь, состоящую из феррита и цементита. Перлит обладает высокой прочностью и твердостью.

Каждая группа сталей отличается структурой и, следовательно, свойствами. Поэтому по структуре определяют назначение стали и способ обработки.

Так, свойства сталей зависят от количества феррита и перлита в структуре. Чем больше углерода, тем доля феррита меньше, а количество перлита в структуре увеличивается.

Стали, содержащие мелкодисперстный перлит, обладают высокой прочностью и твердостью.

В сталях, которые содержат, кроме перлита, вторичный цементит, твердость резко возрастает, а расположение вторичного цементита в виде сетки вокруг перлитовых колоний приводит к тому, что сталь приобретает хрупкость

и ее трудно обработать. Вторичный цементит может выделяться и виде светлых игл, пронизывающих перлит.

Все эти свойства учитываются как при обработке, так и при выборе материала для изготовления деталей.

1.3 Влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали

На рисунке 1 представлены зависимости механических свойств стали от содержания углерода.

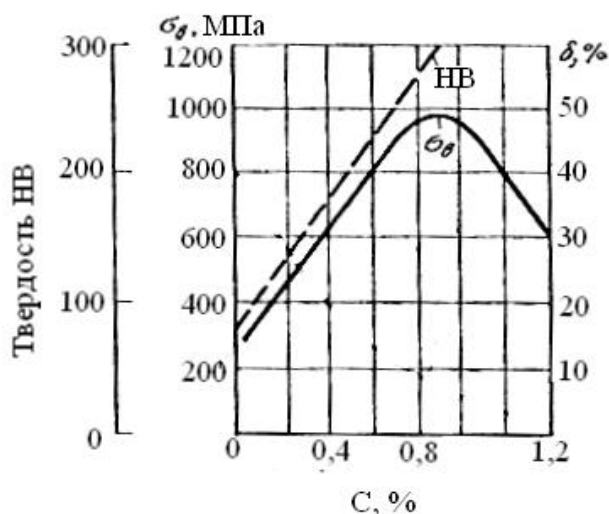


Рисунок 1 - Зависимости механических свойств стали от содержания углерода

В равновесном состоянии сталь представляет собой смесь феррита и цементита. Цементит состоит из твердых и хрупких частиц. Количество цементита увеличивается пропорционально углероду. В связи с этим повышение количества цементита приводит к росту твердости и снижению пластичности (рисунок 1, прямая НВ).

Прочность у доэвтектоидных сталей подчиняется той же зависимости, что и твердость. Однако, в заэвтектоидных сталях, в связи с образованием вторичного цементита, который имеет хрупкий каркас, прочность σ_b начинает уменьшаться (рисунок 1).

От содержания углерода зависят технологические свойства стали: увеличение количества углерода ухудшает обрабатываемость резанием, давлением, свариваемость. Хорошей свариваемостью обладают низкоуглеродистые стали.

2 Твердость. Определение твердости

2.1 Твердость

Твердостью называют свойство материалов сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела, не получающего при этом пластической деформации. В соответствии с данным определением разработаны ряд стандартизированных методов определения твердости металлов, основанных на принципе статического вдавливания стандартного наконечника - индентора в испытуемый материал. В качестве инденторов служит закаленный шарик, алмазный конус, алмазная пирамида или твердосплавный конус. На поверхности испытуемого предмета при вдавливании индентора получается отпечаток, который и является критерием для оценки его твердости.

Определение твердости металлов имеет большое практическое значение и очень широко распространено, так как является наиболее простым, легким и быстрым методом определения механических свойств металлов. Наиболее широкое распространение получили методы измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу.

Существуют общие требования к подготовке образцов и проведению испытаний на твердость:

а) изготовление образцов и подготовка поверхности должны осуществляться способами, исключающими изменения свойств металла из-за нагрева или наклепа;

б) поверхность образца должна быть чистой, без окисных пленок, следов ржавчины или окалины, трещин и прочих дефектов;

в) образцы должны быть определенной толщины. После нанесения отпечатка на обратной стороне образца и его боковых поверхностях не должно быть следов деформации;

г) образцы должны лежать на столике жестко и устойчиво. В процессе испытания образец не должен смещаться или прогибаться;

д) прилагаемая нагрузка должна действовать перпендикулярно поверхности образца;

е) нагрузка должна прилагаться и возрастать плавно до заданного значения, а далее поддерживаться постоянной в течение заданного времени.

2.2 Определение твердости по Бринеллю

При определении твердости методом Бринелля в испытуемый образец или изделие вдавливается в течение определенного времени металлический шарик (рисунок 2).

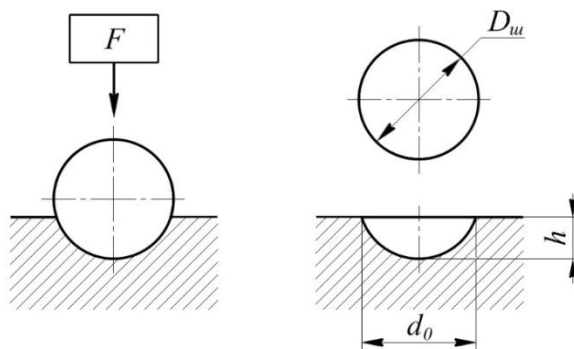


Рисунок 2 – Схема измерения при определении твердости методом Бринелля

После снятия нагрузки на поверхности образца остается сферический отпечаток глубиной h . Твердость по Бринеллю определяется как отношение приложенной нагрузки F к площади поверхности сферического отпечатка. Величина отпечатка зависит от твердости металла: чем тверже металл, тем меньше будет величина отпечатка.

Число твердости по Бринеллю обозначается НВ и определяется по формуле [1]:

$$\text{НВ} = \frac{0,204F}{\pi D_{ш} (D_{ш} - \sqrt{D_{ш}^2 - d_0^2})}, \quad (1)$$

где $D_{ш}$ – диаметр шарика, мм;

d_0 – диаметр отпечатка, мм;

F – нагрузка на шарик, Н.

Чтобы не производить каждый раз вычисления, при определении чисел твердости пользуются специальной таблицей. Зная нагрузку, диаметры шарика и отпечатка, по таблице определяется число твердости НВ.

Обозначение НВ используется при применении стального шарика (для металлов и сплавов с твердостью не более 650 единиц). В обозначение входят также индексы, указывающие условия измерения в следующем порядке: первая цифра перед НВ указывает твердость в МПа (Н/мм^2), первая цифра после НВ указывает диаметр шара в миллиметрах, вторая нагрузка в Н и третья – продолжительность выдержки под нагрузкой в секундах.

Пример: 3000 НВ 2,5/ 1838,7/10 означает твердость по Бринеллю, равную 3000 МПа, при испытании шаром диаметром 2,5 мм под нагрузкой 1838,7 Н при выдержке в течение 10 с.

При применении шарика из твердого сплава (карбида вольфрама) используется обозначение НВW (для металлов и сплавов с твердостью более 650 единиц).

2.3 Определение твердости по Роквеллу

При измерении твердости по Роквеллу алмазный конус или стальной сферический наконечник внедряется в испытуемый образец под действием последовательно прилагаемых нагрузок (рисунок 3).

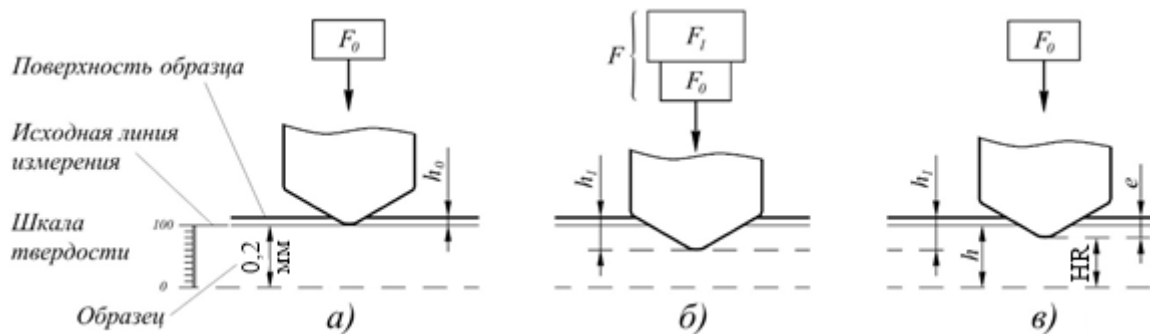


Рисунок 3 – Схема проведения измерения твердости при применении алмазного наконечника по методу Роквелла:

e – глубина внедрения индентора после снятия основной нагрузки;

h_0, h_1 – глубина внедрения под действием предварительной и основной нагрузок.

На рисунке 3,а показано положение индентора в образце под действием предварительной нагрузки F_0 . При повышении нагрузки до значения

$F = F_0 + F_1$, глубина внедрения увеличивается до величины h_1 (рисунок 3,б). После снятия основной нагрузки F_1 глубина внедрения составляет e (рисунок 3,в). Каждое отдельное положение индентора в образце фиксируется с помощью специального индикатора. Число, зафиксированное индикатором при положении индентора согласно рисунку 3,в, указывает число твердости по Роквеллу, HR. Данной твердости соответствует участок HR в образце, как показано на рисунке 3,в.

Приборы для измерения твердости по Роквеллу имеют, как правило, несколько шкал. Твердость по Роквеллу обозначают символом HR с указанием шкалы твердости. Числовое значение твердости состоит из трех значащих цифр. Например, 61,5 HRC – твердость по Роквеллу 61,5 единиц по шкале С.

При измерении с помощью алмазного наконечника используются шкала А, С, Д индикатора. Твердость по Роквеллу определяется по данным шкалам, содержащих 100 единиц (рисунок 3,а). В машиностроении на чертежах указывают твердость по шкале HRC или HB. Твердость в HRC назначают для стали, HB для чугуна, т. к. при контроле конусный индентор может попасть в графитовое включение. В иностранных справочниках твердость по шкале HB применяется и для стали.

Метод Роквелла по сравнению с методом Бринелля имеет следующие преимущества:

- малая повреждаемость поверхности при измерениях;
- получение значений твердости материала без вычисления или использования специальных таблиц.

Нагрузка по методу Роквелла также строго регламентирована.

2.4 Современные методы экспресс-анализа твердости металлов

2.4.1 Определение твердости. Основные методы экспресс-анализа

В последние годы в машиностроении разрабатываются и внедряются в производство новые экспрессные методы определения твердости металлов на

базе использования новых физических принципов и портативного оборудования. К такому типу средств технического анализа относится и комбинированный портативный твердомер типа МЕД-УД. Он позволяет осуществлять контроль твердости ультразвуковым методом и методом отскока.

Твердомер МЕТ-УД позволяет измерять твердость изделий из металлов и сплавов по всем стандартизованным шкалам твердости (Роквелла, Бринелля, Виккерса и Шора). Высокая точность измерений портативных твердомеров этого класса обеспечивается за счет калибровки их по каждой из вышеперечисленных шкал только по эталонным мерам твердости без использования таблиц перевода.

2.4.2 Ультразвуковой резонансный метод анализа (метод *UCI*)

Особенность данного метода заключается в том, что необходимые для расчета величины твердости размеры отпечатков, образующихся при внедрении индентора, оцениваются не как обычно, оптическим способом, а исследуется с помощью электроники путем измерения сдвига ультразвуковой резонансной частоты колебаний специального осциллирующего стержня (рисунок 4).



Рисунок 4 – Схема устройства и действия зонда *UCI*

Суть *UCI* метода при испытаниях на твердость заключается в том, что при вдавливании алмазной пирамидки осциллирующего зонда в материал меняется частота колебаний зонда. Изменение частоты фиксируется приемником устройства. С увеличением твердости глубина проникновения

зонда в материал и сдвиг частоты уменьшается (рисунок 5). Уравнение, описывающее данную связь и уравнение для определения значения твёрдости по Виккерсу, имеют вид [2]:

$$\Delta f \approx E \cdot \sqrt{A}, \quad HV = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

где Δf - сдвиг частоты;

A - глубина проникновения алмазной пирамидки в материал;

E – модуль Юнга;

HV - число твёрдости по Виккерсу;

F - прикладываемое усилие при определении твёрдости по Виккерсу.

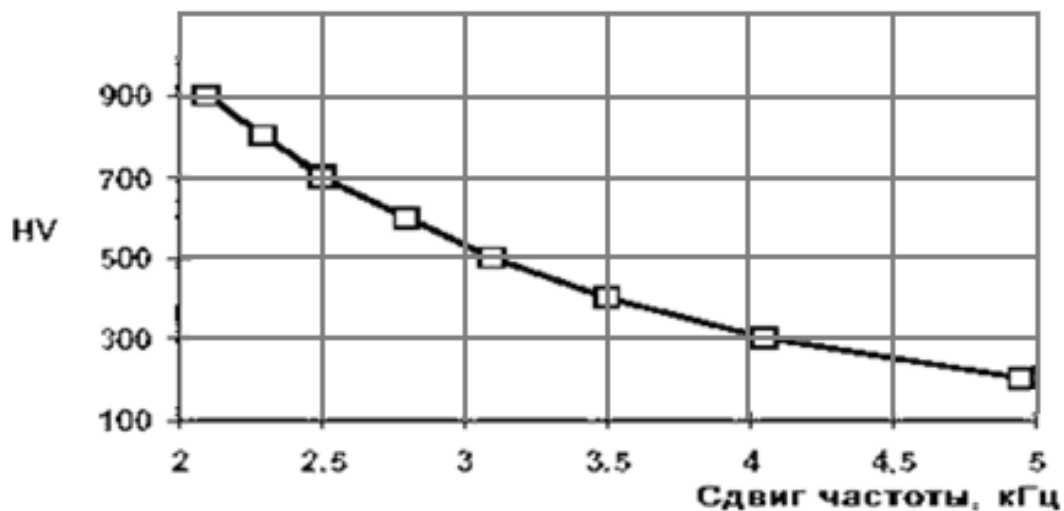


Рисунок 5 – Зависимость твёрдости по Виккерсу от сдвига частоты осциллирующего стержня

Так как сдвиг частоты, кроме глубины внедрения индентора, зависит еще от модуля Юнга – постоянной величины для материала, то при определении твёрдости материалов с различными значениями модуля Юнга прибор необходимо предварительно откалибровать.

2.4.2 Метод отскока (Метод Либя)

Методы отскока широко используются при экспрессных испытаниях на твёрдость и выполняются согласно требованиям *ASTM 956-00* (стандарт американского общества по испытаниям материалов) [2]. Одним из методов

является метод Либа. Приборы для определения твёрдости, использующие метод Либа, работают по принципу учета потери энергии ударного тела, отскакивающего от испытываемого материала (рисунок 6).

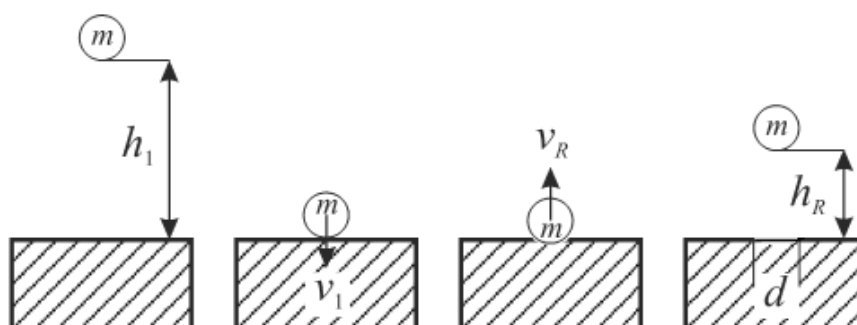


Рисунок 6 – Иллюстрация принципа измерения твёрдости по методу отскока

Ударное тело массой m , на конце которого закреплен шарик из твёрдого материала, падает с высоты h на исследуемую поверхность и отскакивает от нее. Вследствие суммарной пластической деформации материала и шарика в момент удара тело теряет часть своей кинетической энергии, которая преобразуется во внутреннюю энергию системы. Это отражается на величине высоты отскока h_R и скорости отскока v_R и тем больше, чем меньше твёрдость исследуемого материала.

Потеря энергии ударного тела определяется бесконтактным методом путем измерения его начальной скорости и скорости при отскоке (рисунок 7). Для этого служит постоянный магнит 2, закрепленный на ударном теле 1. Магнит, проходя через катушку 3, наводит в ней ЭДС индукции амплитудой A (рисунок 8). Величина ее пропорциональна скорости движения магнита (ударного тела). Так как скорость ударного тела после отскока меньше, то уменьшается и величина амплитуды B , наводимая в катушке после отскока.

Изобретатель этого метода Либ ввел свою собственную величину твёрдости НЛ. Величина твёрдости в размерности НЛ рассчитывается по отношению амплитуд (скоростей) до и после столкновения:

$$HL = 1000 \frac{B}{A}.$$

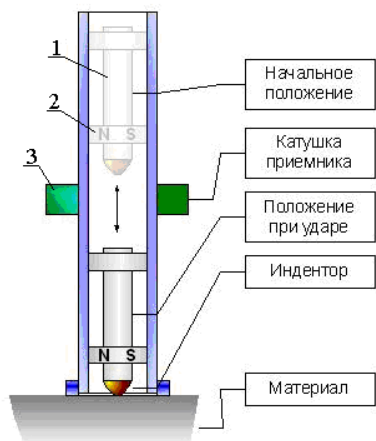


Рисунок 7 - Разрез типичного измерительного устройства по методу отскока

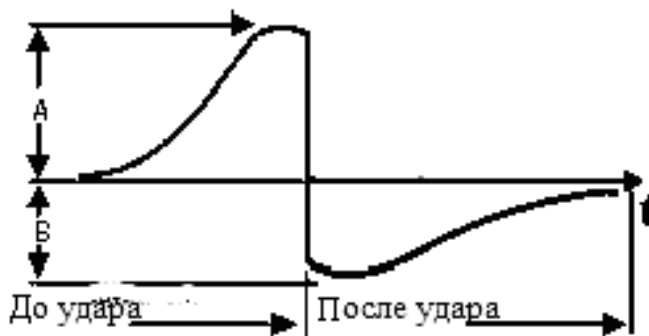


Рисунок 8 - Эпюра напряжения в катушке приемника до и после столкновения

Для практического применения метода и шкалы Либа производится перевод единицы HL к стандартным шкалам твердости (HV, HB, HS, HRC, HRB, Н/мм²). На рисунке 9 в качестве примера показана зависимость для перевода значений твердости в единицах HL в значения твердости в единицах HRC.

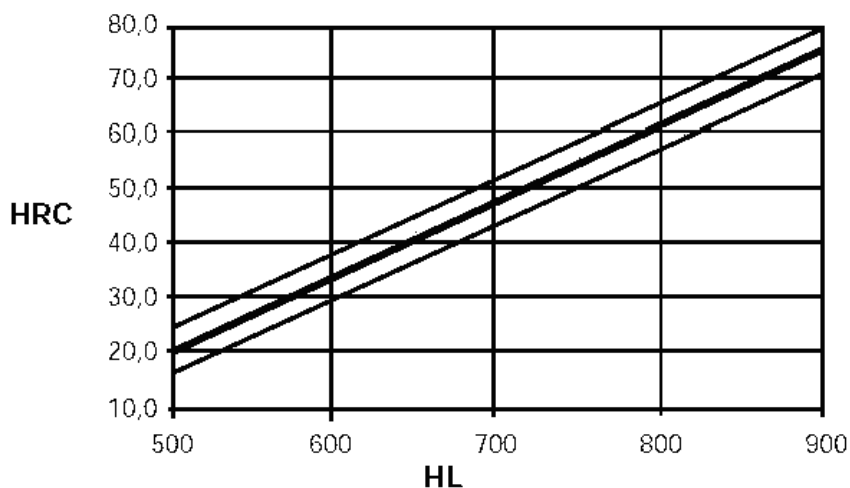


Рисунок 9 - Переход от единиц твердости по Либу (HL) к единицам твердости по Роквеллу (HRC)

Основные требования к массе испытываемого образца и условиям испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оптимальные условия испытания твердости методом Либа и методом UCI по массе и толщине образца

Условия испытания	Метод Либа		UCI метод
	3 мм шарик или пирамидка с энергией удара 12 Н·мм	5 мм шарик с энергией удара 90 Н·мм	UCI
Не требуется поддерживающего основания при массе, кг	>5	>15	>0,3
Требуется поддерживающее основание при массе, кг	От 2 до 5	От 5 до 15	От 0,1 до 0,3
Требуется поддерживающее основание и контактная паста при массе, кг	От 0,05 до 2	От 0,5 до 5	От 0,01 до 0,1
Толщина образца, мм	>20	>20	>2-3

3 Экспериментальное исследование твердости металлов

3.1 Лабораторная работа

«Определение твердости по Бринеллю»

Цель работы: приобретение навыков проведения испытаний на твердость методом Бринелля.

Методика определения твердости по Бринеллю

В работе используется твердомер Бринелля, предназначенный для измерения твердости стали в сыром, отожженном или высокоотпущенном состоянии, а также для всех видов серых чугунов, цветных металлов и сплавов с твердостью менее 450 НВ. Общий вид прибора представлен на рисунке 10.

При измерении твердости испытываемый образец 5 устанавливается на столик 4 и поворотом маховика 3 с помощью винта поднимается до соприкосновения с шариком – индентором 6. Если переключатель 8 режима работ стоит в положении «Ручное», нажимается кнопка 2 «Пуск». При этом включается в работу привод нагружения, обеспечивающий приложение

испытательной нагрузки 7 к образцу. В результате нагружения происходит внедрение индентора в испытуемое изделие. Время нагружения задается с помощью реле времени 10. Выключение твердомера осуществляется кнопкой 1.

После действия нагрузки в течение определенного времени (задается в зависимости от материала образца), электродвигатель привода нагружения включается на реверс и нагрузка снимается. Поворотами маховика 3 опускается столик и снимается образец. На поверхности образца остается отпечаток.

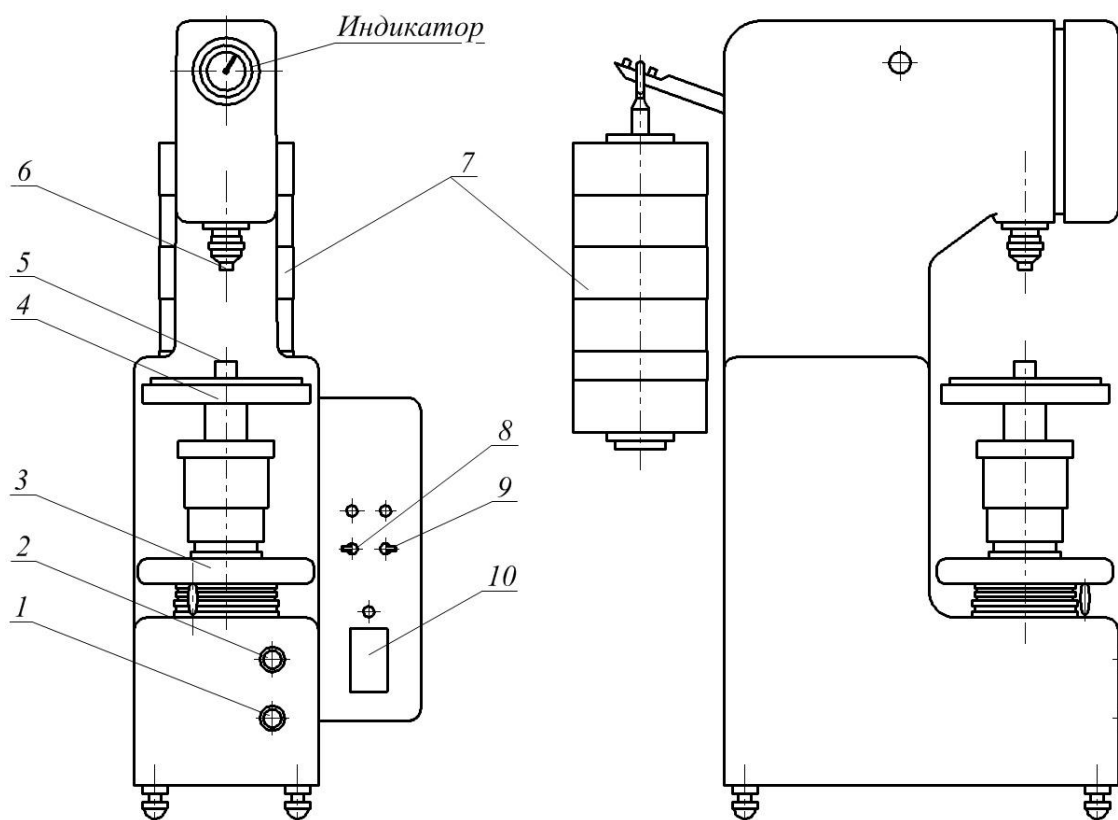


Рисунок 10 - Твердомер Бринелля 2109 ТБ

В комплект твердомера входит набор грузов, обеспечивающих необходимую нагрузку (таблица 2).

Таблица 2 –Определение нагрузок при наборе грузов

Набор грузов	Нагрузка, кН
1 839N+613N+4 903N+2 452N	9,807
1 839N+613N+2 452N+24 903N	14,71
1 839N+613N+2 452N+54 903N	29,42

Измерение отпечатка на образце осуществляется с помощью микроскопа МПБ-2. Микроскоп отсчетный предназначен для измерения диаметра отпечатка (лунки), образуемого на поверхности металла. Внешний вид микроскопа показан на рисунке 11.

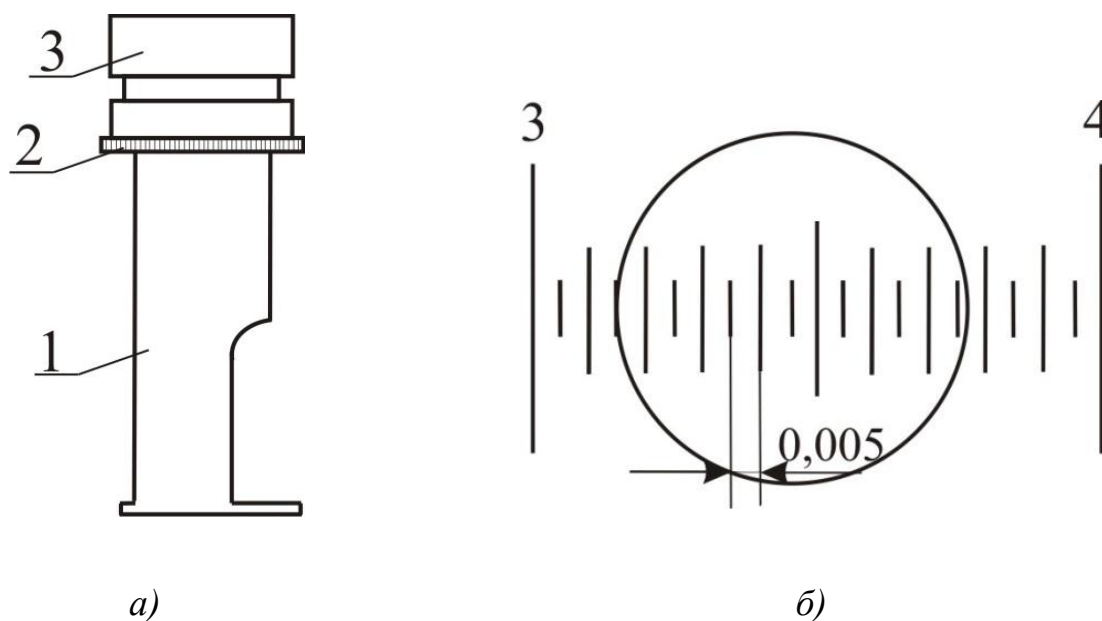


Рисунок 11 – Микроскоп МПБ-2

Методика измерения имеет следующий порядок:

1. Поставить микроскоп ногой 1 на деталь.
2. Вращая тубус 2 добиться отчетливого изображения поверхности металла.
3. Вращая окуляр 3 добиться четкого изображения отчетной шкалы (рисунок 11,б).
4. Измерить размер диаметра отпечатка (лунки), визуально сравнив его с отчетной шкалой как показано на рисунке 11,б (0,062мм).

Цена деления шкалы 0,005мм.

По диаметру измеренного отпечатка число твердости определяется по соответствующей таблице 3.

В таблице 3 приведены числа твердости при нормальных условиях испытания материалов индентором: диаметром 10 мм под нагрузкой $F = 102 \text{ Н}$ с выдержкой 10 с.

Таблица 3– Числа твердости при испытании методом Бринелля

Диаметр отпечатка, мм	НВ	Диаметр отпечатка, мм	НВ	Диаметр отпечатка, мм	НВ
		3,40	321	4,60	170
		3,45	311	4,65	167
		3,50	302	4,70	163
		3,55	293	4,75	159
		3,60	285	4,80	156
		3,65	2770	4,85	152
		3,70	269	4,90	149
		3,75	262	4,95	146
		3,80	255	5,00	143
		3,85	248	5,05	140
		3,90	241	5,10	137
		3,95	235	5,15	134
		4,00	229	5,20	131
		4,05	223	5,25	128
2,90	444	4,10	217	5,30	126
2,95	429	4,15	212	5,35	123
3,00	415	4,20	207	5,40	121
3,05	401	4,25	201	5,45	118
3,10	388	4,30	197	5,50	116
3,15	375	4,35	192	5,55	114
3,20	363	4,40	187	5,60	111
3,25	352	4,45	183	5,65	109
3,30	341	4,50	179	5,70	107
3,35	331	4,55	174	5,75	105

Нагрузка для испытания определяется через соотношение между диаметром шарика и коэффициентом K :

$$K = \frac{0,102F}{D_{ш}^2}, \text{ Н/мм}^2. \quad (3)$$

Для выбора испытательной нагрузки F в зависимости от значения K и диаметра индентора используются данные, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Значение нагрузки F при испытании по методу Бринелля

Диаметр шарика $D_{ш}$, мм	Нагрузка, Н (кгс) для K					
	30	15	10	5	2,5	1
10,0	29 420 (3 000)	14 710 (1 500)	9 807 (1 000)	4 903 (500)	2 452 (250)	9 807 (100)

Значения K для разных материалов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Значение K

Материал	Твердость по Бринеллю	K
Медь и сплавы на ее основе	от 35	10
Сталь, чугун, высокопрочные сплавы	до 140 140 и более	10 30

Порядок выполнения работы

1. Ознакомление с работой твердомера.
2. Для заданного диаметра индентора $D_{ин} = 10$ мм, и образца №1 (медь) используя таблицы 3 и 4 выбрать значение K и испытательную нагрузку F .
3. Набором грузов подобрать соответствующую нагрузку и навесить на рычажную систему прибора.
4. Установить переключатель режима работы 8 в положение РУЧНОЕ.
5. Установить по реле времени 10 значение равное 10 с.
6. Установить на предметный стол прибора образец №1.
7. С помощью маховика 3 поднять предметный стол до соприкосновения индентора 6 с испытуемым образцом. Момент контакта определяется по индикатору.
8. Включить прибор в сеть (ключ 9).
9. Кнопкой 2 «Пуск» запустить электродвигатель прибора.
10. После остановки двигателя с помощью маховика 3 опустить предметный стол и снять испытуемое изделие 5.
11. Измерить диаметр d_0 полученного отпечатка с помощью микроскопа МПБ-2. Диаметр отпечатка измеряется в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяется как среднее арифметическое значение двух измерений. При определении диаметров d_0 разности измерений не должна превышать 2 %.
12. Определить по формуле (1) твердость образца №1. Сравнить полученный результат со значением из таблицы 2 (используя найденное значение диаметра d_0).

13. Определить твердость образцов, №2 (сталь) и №3 (чугун) по методике п.п. 7 – 12.

14. Результаты всех опытов занести в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты эксперимента

Образец	Диаметр отпечатка	Твердость, НВ	
		расчетная	из таблицы 2
1			
2			
3			
4			
5			

15. Провести анализ полученных результатов.

16. Оформить отчет. В отчете отразить схему определения твердости по Бринеллю, результаты расчета твердости и экспериментальные данные.

Контрольные вопросы

1. Что такое твердость?
2. Что лежит в основе определения твердости с помощью статистических методов?
3. Какие методы определения твердости существуют?
4. Основные требования к образцам при определении твердости.
5. В чем сущность метода Бринелля?
6. Какая методика используется при определении твердости по Бринеллю?
7. Чем принципиально отличаются методы Бринелля и Роквелла?
8. Как производится выбор нагрузки в методе Бринелля?
9. Какие измерительные операции производятся при определении твердости по Роквеллу?
10. Расшифруйте обозначения твердости при различных методах ее определения.
11. Почему метод Роквелла не используется для определения твердости чугуна?

3.2 Лабораторная работа

«Измерение твердости твердомером МЕД-УД»

Цель работы: изучение методов экспресс-анализа твердости материалов, приобретение практических навыков при определении твердости различных материалов с использованием комбинированного твердомера типа МЕД-УД.

Назначение твердомера

Твердомер МЕТ-УД предназначен для измерения твёрдости металлов и сплавов по всем стандартизованным в России шкалам твёрдости – Роквелла (HRC), Бринелля (HB), Виккерса (HV) и Шора (HSD). Калибровка твердомера по шкалам твёрдости HRC, HB, HV, HSD осуществляется предприятием-изготовителем.

В нем также предусмотрены 3 дополнительные шкалы твёрдости H1, H2, H3, которые позволяют проводить измерение твёрдости по другим шкалам (шкала «В» Роквелла (HRB), шкалы Супер-Роквелла (HRN и HRT), Либа (HL));

С помощью твердомера МЕД - УД можно проводить измерение твёрдости поверхностного слоя металла, подвергнутого наплавлению, напылению, механической, термической и другим видам поверхностной обработки металла. Такой контроль твёрдости недоступен для стационарных твердомеров, которые под действием больших нагрузок "продавливают" поверхностный слой.

Твердомер применяется для экспресс-анализа твёрдости изделия непосредственно на месте эксплуатации или производства изделия в цеховых, лабораторных и полевых условиях. Например, в машиностроении, металлургии, энергетике, судостроении и железнодорожном транспорте, в авиакосмической и нефтегазовой отраслях, ремонтно-монтажных и сервисных организациях и т.д.

В таблице 7 представлены основные технические характеристики твердомера.

Таблица 7 - Основные технические характеристики твердомера МЕД-УД

Основные шкалы	Диапазон измерений	Погрешность, не более
«С» Роквелла	20 - 67 HRC	±1,5 HRC
Бринелля	75 - 650 HB	±10 HB
Виккерса	75 -1000 HV	±12 HV
Шора	23 - 102 HSD	±2 HSD
Дополнительные шкалы	Диапазон измерений	Погрешность, не более
Предел прочности	378 - 1736 R _m	5%
H1, H2 и H3	по заказу	5%

Устройство и принцип работы твердомера

На рисунке 12 показаны основные элементы твердомера, а на рисунках 13 и 14 устройства ультразвукового и динамического датчиков.



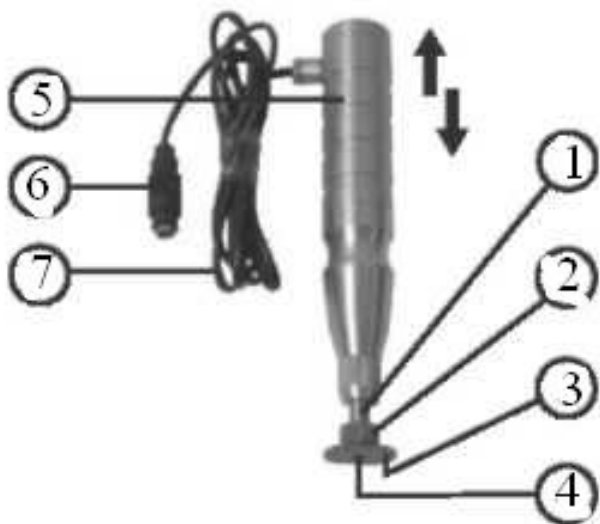
Рисунок 12 – Элементы твердомера МЕД-УД:

1 – электронный блок; 2 – датчик ультразвуковой У1; 3 – датчик динамический Д1

Датчики связаны с электронным блоком при помощи кабелей.

Датчик ультразвуковой У1

Основным элементом ультразвукового датчика У1 является расположенный внутри корпуса стальной стержень с алмазной пирамидой Виккерса на конце (угол между гранями 136°), служащий акустическим резонатором (вибратором) встроенного автогенератора ультразвуковой частоты (рисунок 13).



Назначение элементов:

- 1) втулка;
- 2) прижимное кольцо насадки;
- 3) нижняя плоскость насадки;
- 4) торец втулки;
- 5) корпус датчика;
- 6) штекер разъёма датчика;
- 7) соединительный кабель.

Рисунок 13 – Устройство датчика ультразвукового У1

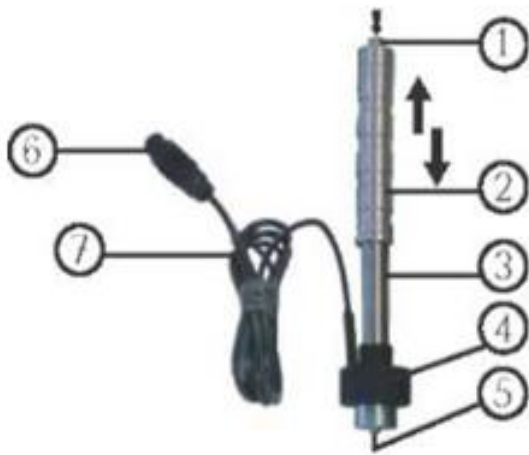
При внедрении пирамиды в контролируемое изделие под действием фиксированного усилия калиброванной пружины происходит изменение собственной частоты резонатора, определяемое твёрдостью материала. Относительное изменение частоты резонатора преобразуется электронным блоком в значение твёрдости выбранной шкалы и выводится на дисплей.

Конструкция датчика ультразвукового позволяет проводить измерения в труднодоступных местах (например, поверхность зубьев шестерён и пр.), а также на тонкостенных конструкциях (например, трубопроводах и пр.), в которых невозможно использование датчиков других типов.

Он может быть использован для измерения твердости на изделиях с глянцевой поверхностью, поскольку видимых отпечатков в процессе измерений не образуется.

Датчик динамический Д1

Принцип действия датчика Д-1 основан на определении отношения скоростей удара и отскока бойка, расположенного внутри корпуса (рисунок 14). На конце бойка закреплен твердосплавный шарик, непосредственно контактирующий с контролируемой поверхностью в момент удара. К бойку прикреплен постоянный магнит.



Назначение элементов:

- 1) спусковая кнопка;
- 2) верхний корпус датчика;
- 3) нижний корпус датчика;
- 4) катушка индуктивности;
- 5) боёк;
- 6) штекер разъёма датчика;
- 7) соединительный кабель.

Рисунок 14 – Устройство датчика Д1

По величине отношения скоростей удара электронный блок определяет твердость материала.

Данный метод особенно эффективен при измерениях твёрдости на массивных изделиях, изделиях с крупнозернистой структурой, кованных и литых изделиях.

Конструкция и принцип работы датчика динамического позволяют производить измерение твердости в течение короткого времени, не более 2-х секунд.

Электронный блок твердомера

На рисунке 15 представлен внешний вид электронного блока твердомера тип МЕД-УД.



- 1) дисплей.
- 2) функциональные клавиша.
- 3) тип твердомера.

Рисунок 15 – Электронный блок твердомера тип МЕД-УД

Элементы блока:

- 1) жидкокристаллический дисплей ЖКД (далее дисплей);
- 2) четыре функциональные клавиши: (\uparrow , \downarrow , \leftarrow , \Rightarrow);
- 3) схема управления твердомером (на обороте);
- 4) гнездо четырёхштырькового разъёма для подключения зарядного устройства или компьютера на корпусе блока;
- 5) гнездо пятиштырькового разъёма для подключения датчиков.

Схема управления работой твердомера показана на рисунке 16.

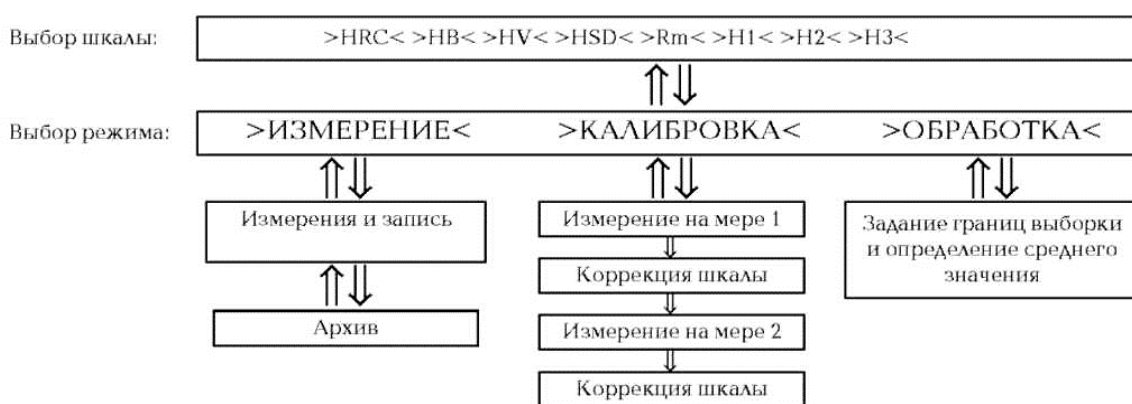


Рисунок 16 – Схема управления твердомером

Управление работой твердомера производится на основе трехуровневого меню, на каждом уровне которого производится выбор параметров или режимов работы.

- Первый уровень **«Шкала»** позволяет выбрать текущую (рабочую) шкалу твёрдости из следующего списка: HRC, HB, HV, HSD, R_m, H1, H2 или H3.
- Второй уровень **«Измерение-калибровка-обработка»** позволяет выбрать текущий (рабочий) режим твердомера: измерение, калибровка или обработка.
- Третий уровень **«Да/Нет»** позволяет подтвердить или отменить выбранную операцию, а также последовательно вернуться к предыдущим операциям нажатием клавиши \uparrow .

Клавиши \uparrow и \downarrow позволяют выбрать уровень меню, а клавиши \leftarrow и \rightarrow выбрать параметр внутри уровня.

Порядок и программа выполнения работы

1. Ознакомиться с методами экспресс-анализа измерения твёрдости металлов.

2. Изучить руководство по эксплуатации твердомера МЕТ-УД. Описание находится в лаборатории.

3. Получить прибор МЕТ-УД проверить его готовность к работе согласно руководству по эксплуатации.

4. Получить меры твёрдости по Бриннелю (МТБ-1) и меры твёрдости по Роквеллу (МТР-1). На оборотной стороне каждой меры обозначены значения их твердости.

5. Согласно инструкции по работе с датчиками произвести измерения твёрдости, используя методы УСІ и Либа, в пяти произвольных точках на каждом образце, рассчитать среднее значение твердости. Результаты занести в таблицу 8. Сравнить полученное среднее значение твёрдости со значениями твёрдости, обозначенными на образцах. При расхождениях более чем на 10 НВ повторить измерения для получения более точного результата.

6. Произвести измерения твердости выданных контрольных образцов. Измерения проводить согласно пункту 5. Результаты занести в таблицу 8.

Вычислить среднее значение, отклонение от среднего значение результатов измерения и абсолютную погрешность измерения.

Таблица 8 – Таблица измерений эталонных образцов и обработки результатов испытаний

Эталонный образец	Метод измерения твёрдости, датчик	Измеренное значение твёрдости (5 измерений, x_i)	Среднее значение	Отклонения результатов от среднего значения	Среднее значение абсолютной погрешности измерения	Отклонение от эталонного значения
МТБ-1	Метод Либа	x_1 x_2 x_3 x_4 x_5	\bar{x}	$\bar{x} - x_1$ $\bar{x} - x_2$ $\bar{x} - x_3$ $\bar{x} - x_4$ $\bar{x} - x_5$	$\Delta \bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (\bar{x} - x_i) $	$X_{эТ} - (\bar{x} \pm \Delta \bar{x})$
МТР-1	Метод UCI	x_1 x_2 x_3 x_4 x_5	\bar{x}	$\bar{x} - x_1$ $\bar{x} - x_2$ $\bar{x} - x_3$ $\bar{x} - x_4$ $\bar{x} - x_5$	$\Delta \bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (\bar{x} - x_i) $	$X_{эТ} - (\bar{x} \pm \Delta \bar{x})$

Таблица 9 – Таблица измерений контрольных образцов и обработки результатов испытаний

Образец №	Метод измерения твёрдости, датчик	Значение твёрдости (5 измерений)	Среднее значение	Отклонения результатов от среднего значения	Среднее значение абсолютной погрешности измерения
Образец № 1	Метод Либа	x_1 x_2 x_3 x_4 x_5	\bar{x}	$\bar{x} - x_1$ $\bar{x} - x_2$ $\bar{x} - x_3$ $\bar{x} - x_4$ $\bar{x} - x_5$	$\Delta \bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (\bar{x} - x_i) $
Образец № 2	Метод UCI	x_1 x_2 x_3 x_4 x_5	\bar{x}	$\bar{x} - x_1$ $\bar{x} - x_2$ $\bar{x} - x_3$ $\bar{x} - x_4$ $\bar{x} - x_5$	$\Delta \bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (\bar{x} - x_i) $

4. Составить отчет. Отчет по работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Описание сущности использованных методов и средств экспресс-анализа твёрдости металлов.
3. Назначение прибора МЕТ-УД и его основные технические характеристики.
4. Таблицу результатов измерения твёрдости эталонных образцов МТБ-1 и МТР-1 (таблица 8).
5. Таблицу результатов измерения контрольных образцов (таблица 9).
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Область применения методов экспресс-анализа.
2. Сущность измерения твёрдости методом отскока.
3. Сущность ультразвукового резонансного метода измерения твёрдости.
4. Преимущества методов экспресс-анализа перед традиционными методами измерения твёрдости.
5. Определение твердости методом Бринелля.
6. Определение твердости методом Роквелла.
7. Определение твердости методом Виккерса.
8. Определение твердости методом Шора.
9. Определение твердости методом ударного отпечатка.
10. Определение микротвердости металла.

Список использованных источников

1. Кузьмин Б. А. и др. Технология металлов и конструкционные материалы. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
2. Асланян Э. Метрологическое обеспечение измерений твёрдости. // "Измерительная техника", 2005. – С. 45-50.
3. Ю. Славский. Методы измерений твёрдости металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
4. Современные приборы измерения твёрдости валков прокатных станов. Фазлиахметов Р.С., Голотвин Д. А., Волков В. П. //Материалы конферен. "Продукция прокатных валков на Уралмашзаводе". Екатеринбург, 2003. – С. 40-44.
5. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. Ф. Фролов (пред.) и др. Измерение, контроль, испытание и диагностика. Т. 14-7/ В. В. Ключев и др./ Под общ. ред. В. А. Ключева. – М.: Машиностроение, 1996. – 464 с.

Учебное издание

Аверин Николай Витальевич

Гнидо Валерий Федорович

Иванюк Анатолий Васильевич

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Учебно–методическое пособие

Подписано в печать _____. Тираж 25 экз.

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета

390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53