

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра общей физики

О. Н. Каныгина, М. М. Филяк, А. Г. Четверикова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 03.03.02 Физика, 12.03.04 Биотехнические системы и технологии, 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств и 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Оренбург

2018

УДК 539.53(076.5)
ББК 22.37я7
К19

Рецензент – доцент, кандидат технических наук А. С. Лелюхин

К19 **Каныгина, О.Н.**
Определение твердости твердых тел: методические указания / О. Н. Каныгина, М. М. Филяк, А. Г. Четверикова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 27 с.

Методические указания включают теоретическое изложение материала, описание методик проведения реального и виртуального экспериментов по определению твердости различных материалов, контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по дисциплинам «Физическое материаловедение», «Микромеханика разрушения», «Материалы электронной техники» обучающимися по направлениям подготовки 03.03.02 Физика, 12.03.04 Биотехнические системы и технологии, 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств и 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника.

УДК 539.53(076.5)
ББК 22.37я7

© Каныгина О.Н.,
Филяк М.М.,
Четверикова А.Г., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

1 Механические свойства твердых тел	4
2 Методы определения твердости	8
2.1 Твердость по Бринеллю	10
2.2 Твердость по Виккерсу	11
2.3 Твердость по Роквеллу.....	12
3 Определение твердости в реальном эксперименте.....	14
3.1 Принцип действия и краткое описание твердомера ТП-2	14
3.2 Порядок выполнения работы	18
4 Определение твердости методом Бринелля в виртуальном эксперименте.....	19
4.1 Порядок выполнения работы	20
5 Контрольные вопросы.....	21
Список использованных источников	21
Приложение А Увеличение и разрешающая способность оптического микроскопа.....	23
Приложение Б Приготовление шлифов	25
Приложение В Механические свойства современных конструкционных материалов	26

1 Механические свойства твердых тел

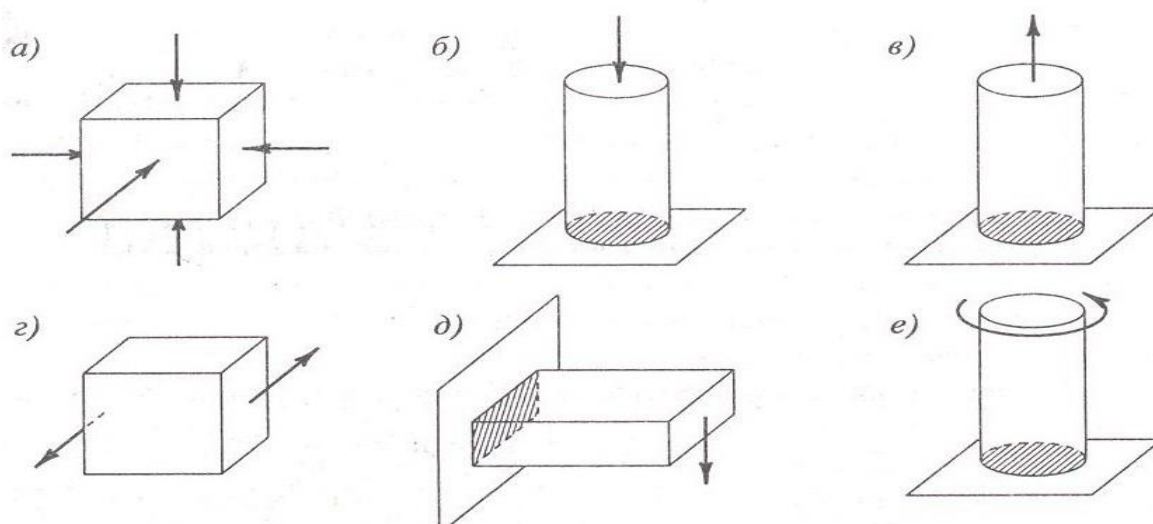
Под механическими свойствами понимают характеристики, определяющие поведение твердых тел под действием приложенных внешних механических сил. К механическим свойствам относят сопротивление твердых тел деформации и разрушению.

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием приложенных сил. Воздействие внешних механических сил (нагрузок) на твердые тела может быть различным: одностороннее или всестороннее сжатие или растяжение, изгиб, кручение, сдвиг (рисунок 1).

Изменения формы могут быть сложными, комбинированными. Например, при одностороннем растяжении цилиндрического образца его удлинение Δl сопровождается уменьшением площади поперечного сечения (сужением) ΔS .
Отношение

$$\nu = - (\Delta l / l) / (\Delta S / S) \quad (1)$$

называется коэффициентом Пуассона. Для несжимаемого вещества $\nu = 0,5$, для реальных тел – несколько меньше.



a) – всестороннее сжатие; б) – одностороннее сжатие; в) – растяжение; г) – сдвиг; д) – изгиб; е) кручение (заштрихованы закрепленные поверхности) [1]

Рисунок 1 - Воздействие различных нагрузок на твердые тела

Если деформация устраняется после прекращения действия внешних сил на твердое тело, она называется упругой и описывается законом Гука:

$$\varepsilon = \sigma / E, \quad (2)$$

где $\varepsilon = \Delta l / l_0$ – относительная деформация,

σ – внешняя нагрузка.

Величина, определяемая по формуле (2) как σ / ε называется: для растяжения – модулем Юнга (E), для сдвига – модулем сдвига (G), для сжатия – модулем объемного сжатия (K). Между ними существует зависимость:

$$E = 3KG / (K + G/3). \quad (3)$$

Максимальное напряжение, при котором выполняется закон Гука (точка A на рисунке 2), называется пределом упругости. При превышении предела упругости (или, как его принято называть, предела текучести) деформация становится необратимой. Максимальное напряжение, выдерживаемое твердым телом (точка B) называется пределом прочности. Затем напряжение, необходимое для дальнейшей деформации снижается (участок BD'). Остаточная деформация OC называется пластической, а часть CB' – упругой. При некоторых величинах σ и ε происходит разрушение твердого тела, т.е. разъединение частей образца по некоторым

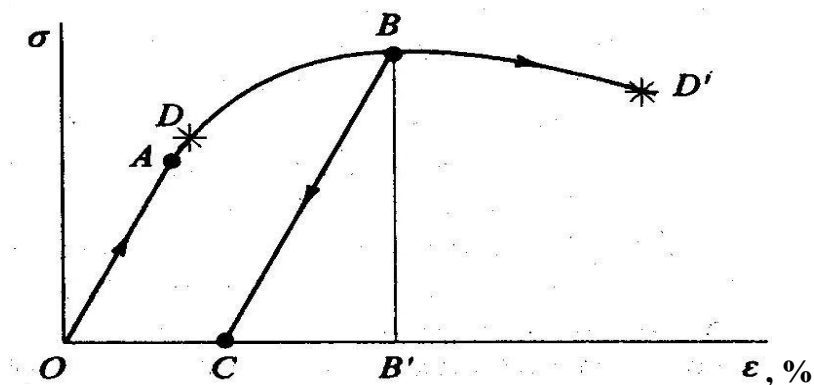


Рисунок 2 - Зависимость деформации ε от напряжения σ [1]

поверхностям. Разрушение может наступать либо еще на упругом участке зависимости деформации от напряжения или вскоре после предела текучести (в точке D на рисунке 2), или после большой пластической деформации (в точке D'). В

первом случае наблюдается хрупкое разрушение, а во втором – вязкое.

В современной теории разрушения хрупких твердых тел [1-7] различают два этапа роста трещин: медленный, скорость которого ограничена скоростью протекания процессов разрыва межатомных связей в вершине трещины, и быстрый, при котором скорость роста трещины определяется скоростью подачи упругой энергии от нагружающего устройства и объема тела в вершину трещины. Предлагается модель роста трещины: образование в вершине трещины зародышей предразрушающего состояния, а затем разрыв межатомных связей внутри зародышей в плоскости трещины.

Физическая природа прочности исследует механизмы, ведущие к разрушению твердого тела. Разрушение естественно характеризовать либо некоторой скоростью, либо временем, за которое процесс развивается до определенной степени и приводит к разрыву. Наиболее простой и легко определяемой характеристикой, отражающей кинетическую природу процесса, может служить величина долговечности твердых тел. Долговечность t – время от момента приложения нагрузки до разрушения образца, обратно пропорциональна усредненной скорости разрушения v :

$$t=1/v=Ae^{-\alpha\sigma}, \quad (4)$$

где A и α - константы материала при данной температуре,

σ - напряжение.

Тепловое движение играет существенную роль в ходе разрушения тела. Тепловые флуктуации позволяют атомам или молекулам преодолевать потенциальные барьеры, рассоединения атомы в нагруженных твердых телах. Время процесса разрушения:

$$t=t_0 \exp[(U_0 - \chi\sigma)/kT], \quad (5)$$

где U_0 – величина межатомной связи, постоянная для данного вещества в

отсутствии нагрузки;

$\chi\sigma$ – работа, которую в разрушении тела выполняет внешняя сила;

k – постоянная Больцмана;

T – температура.

Величина χ описывает влияние напряжений на долговечность и в отличие от U_0 и t_0 ($t_0=10^{-13}$ сек) зависит от наличия дефектов и структурных факторов.

Внешняя нагрузка, облегчив термофлуктуационный распад связей, затрудняет их рекомбинацию, атомы оказываются отодвинутыми друг от друга на расстояния больше обычных. Для восстановления связи требуется очень большая флуктуация. Такие флуктуации возникают редко. Скорость распадов связей значительно превышает скорость их реставрации. Начинается накопление разорванных связей.

Процесс разрушения тел на уровне элементарных актов может быть условно разделен на три стадии:

- 1) возбуждение межатомных связей в нагруженном теле, ведущее к уменьшению энергетического барьера U_0 на величину $\chi\sigma$;
- 2) разрыв напряженных связей за счет термических флуктуаций;
- 3) накопление разорванных связей.

На более крупномасштабных (мезо-) уровнях существуют следующие стадии разрушения:

- 1) концентрация напряжений в отдельных областях;
- 2) возникновение в нагружаемом теле мельчайших, зародышевых субмикроскопических трещин;
- 3) переход к более крупным микро-, а затем и макротрещинам.

Реальная структура твердых тел, как правило, носит сложный и многоуровневый характер. Прочность и вид разрушения во многом определяются атомной и электронной структурой. Тип связи отражается на механизмах разрушения. Механические свойства вещества зависят от типа и прочности химической (межатомной) связи. Химическая связь – это взаимодействие атомов, в процессе которого происходит перестройка электронных оболочек связывающихся атомов, сопровождающаяся понижением энергии всей системы с одновременным

образованием единого электронного облака. Различают пять типов химического взаимодействия: ионную, ковалентную, металлическую, водородную связи и ван-дер-ваальсовы – силы. Наиболее прочны ковалентные и ионные связи, их энергия выше, чем у металлической связи. Значительно более слабыми связями являются ван-дер-ваальсовы и водородные.

Механические свойства определяют с помощью статических или динамических испытаний. Статическими называются испытания, при которых прилагаемая к образцу нагрузка возрастает медленно и плавно (растяжение, изгиб, измерение твердости). При динамических испытаниях (удар) скорость деформирования значительно выше, чем при статических.

2 Методы определения твердости

Твердостью называется способность материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого тела. Издавна в качестве ориентира применяют шкалу твердости по Моосу, т.е. обозначают стандартные материалы твердых тел 10 видов - от талька до алмаза, которые ступенчато классифицированы от 1 до 10 с помощью сравнения твердости при взаимном царапании этих материалов и испытываемых твердых тел. Твердость многих оксидных материалов по шкале Мооса имеет высокое значение (таблица 1). Понятие «царапина» означает, что поверхность твердого тела подверглась пластической деформации.

С помощью экспериментальных методов твердость можно выразить не только качественно, но и количественно. Твердость измеряют специальными приборами (твердомерами). Вдавливание испытательного наконечника (индентора) - закаленного стального шарика, алмазной пирамиды или конуса в поверхность испытываемого материала производят при строго определенных (стандартных) нагрузках.

Твердость считается тем больше, чем меньше лунка, остающаяся после вдавливания индентора. Существующие методы измерения твердости значительно отличаются друг от друга по форме применяемого индентора, условиям приложения

нагрузки и способу расчета чисел твердости. Выбор метода определения твердости зависит от различных факторов: твердости и размеров образца (детали), толщины слоя, твердость которого надо измерить.

Способы определения твердости делят на статические и динамические в зависимости от скорости приложения нагрузки, по способу ее приложения на методы вдавливания и царапания. Во всех методах испытания на твердость очень важно правильно подготовить поверхностный слой образца. Все поверхностные дефекты (окалина, ржавчина, выбоины, вмятины, грубые риски и т.д.) должны быть удалены. Требования к качеству испытываемой поверхности зависят от применяемого индентора и величины прилагаемой нагрузки. Чем меньше глубина вдавливания индентора, тем выше должна быть чистота поверхности и тем более строго нужно следить за тем, чтобы свойства поверхностного слоя не изменялись вследствие наклепа (поверхностного упрочнения) или разогрева при шлифовании и полировке.

Таблица 1 - Шкала твердости по Моосу [2, 7]

<i>Материал</i>	<i>Твердость по Моосу</i>	<i>Характеристика твердости</i>
Тальк, мел	1	Легко чертится ногтем
Каменная соль, гипс	2	Чертится ногтем
Кальцит, ангидрид	3	Легко чертится стальным ножом
Плавиновый шпат	4	Чертится стальным ножом при небольшом давлении
Апатит	5	Чертится стальным ножом при большом нажиме. Стекло не чертит
Ортоклаз	6	Слегка царапает стекло
Кварц	7	Легко чертят стекло
Топаз	8	Легко чертят стекло
Корунд	9	Стальным ножом не чертятся
Алмаз	10	Стальным ножом не чертятся

Нагрузка должна прилагаться по оси вдавливаемого индентора перпендикулярно испытываемой поверхности. Неплоские образцы крепят на специальных опорных столиках, входящих в комплект твердомеров.

Результаты испытаний на твердость зависят от продолжительности приложения нагрузки к вдавливаемому индентору τ . Различают кратковременную и длительную твердость. В стандартных методах определяют кратковременную твердость при комнатной температуре: обычно $\tau=10-30$ с. Длительная твердость оценивается при повышенных температурах и используется как характеристика жаропрочности материала.

При определении твердости измеряют суммарное сопротивление материала внедрению в него индентора, усредняющее твердость всех имеющихся структурных компонентов. Поэтому получающийся после снятия нагрузки отпечаток должен быть по размеру значительно больше размеров зерен отдельных фаз (диаметр или длина диагонали отпечатков при измерении твердости меняется от 0,1-0,2 мм до нескольких мм). Неизбежные различия в структуре разных участков образца приводят к разбросу значений твердости. Разброс тем больше, чем меньше размер отпечатка.

2.1 Твердость по Бринеллю

При стандартном (ГОСТ 9012-92) измерении твердости по Бринеллю стальной шарик диаметром D вдавливают в испытуемый образец под нагрузкой P , приложенной в течение определенного времени, и после снятия нагрузки измеряют диаметр d оставшегося на поверхности отпечатка (рисунок 3).

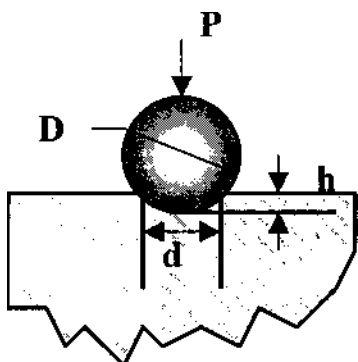


Рисунок 3 - Схема испытания твердости по Бринеллю [4]

В поверхностном слое под индентором идет интенсивная пластическая деформация, а диаметр отпечатка получается тем меньше, чем выше сопротивление материала образца деформации, производимой индентором. Число твердости по Бринеллю (НВ) есть отношение нагрузки P ,

действующей на шаровой индентор диаметром D , к площади S шаровой поверхности отпечатка:

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (6)$$

Площадь отпечатка может быть определена и по глубине вдавливания индентора h : $S = \pi Dh$. Используемые в качестве индентора шарики из закаленной стали или твердого сплава имеют диаметры $D = 10; 5; 2,5; 1,25; 1$ мм. Диаметр отпечатка d должен укладываться в интервале $(0,2-0,7)D$.

Испытание материалов с использованием шариков различной величины следует проводить при постоянном отношении P/D^2 . Поверхность образцов следует подготовить так, чтобы диаметр образующего отпечатка можно было измерить с достаточной точностью (0,01-0,05 мм). Минимальная толщина испытуемого образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка. Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее $2,5d$, а расстояние между центрами двух соседних отпечатков - не менее $4d$ (для металлов с $HB < 35$ эти расстояния равны соответственно $3d$ и $6d$).

С помощью метода Бринелля можно испытывать материалы с твердостью от $HB8$ до $HB450$. При большей твердости образца шарик индентора пластически деформируется на величину, превышающий стандартизованный допуск.

2.2 Твердость по Виккерсу

Определение твердости по Виккерсу осуществляют таким же образом, как и по Бринеллю. Различие заключается в том, что в качестве индентора используют алмазную пирамиду, в связи с чем появляется возможность испытывать самые твердые материалы, используемые в технике.

При стандартном измерении твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999-59) в поверхность образца вдавливаются алмазный индентор в форме четырехгранной

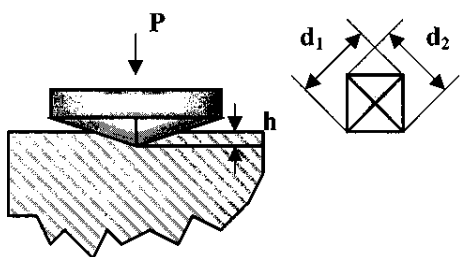


Рисунок - 4. Определение твердости по Виккерсу [4]

пирамиды с углом при вершине $\alpha=136^\circ$ (рисунок 4).

Твердость по Виккерсу HV, как и твердость по Бринеллю, определяется отношением приложенной нагрузки P к площади поверхности пирамидального отпечатка S. Поскольку поверхность отпечатка не всегда имеет форму квадрата, для расчета твердости используется среднее значение двух диагоналей, тогда

$$HV = \frac{P}{S}; \quad S = \frac{d^2}{2 \sin \frac{136^\circ}{2}} = \frac{d^2}{1,854} \quad (7)$$

При определении твердости по Виккерсу приложенная нагрузка заметно меньше, чем при определении твердости по Бринеллю. Наиболее предпочтительны нагрузки 49, 98, 196, 294, 490, и 980 Н. В стандартном случае применяют нагрузку 294 Н, действующую в течении 10-15 с. Величины твердости до HV 300, определяемые по Виккерсу, совпадают с величинами твердости по Бринеллю.

2.3 Твердость по Роквеллу

При измерении твердости по Роквеллу инденторы - алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом округления 0,2 мм или стальной шарик диаметром 1,5875 мм (1/16 дюйма) вдавливаются в образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок: предварительной основной P_0 и общей $P=P_0+P_1$, здесь P_1 – добавочная временная нагрузка.

Число твердости по Роквеллу измеряют в условных единицах и она не является мерой глубины вдавливания индентора под определенной нагрузкой.

Вначале индентор вдавливается в поверхность образца под предварительной нагрузкой $P_0=98$ Н, которая не снимается до конца испытания (рисунок 5, I). Это обеспечивает повышенную точность испытания, так как исключает влияние

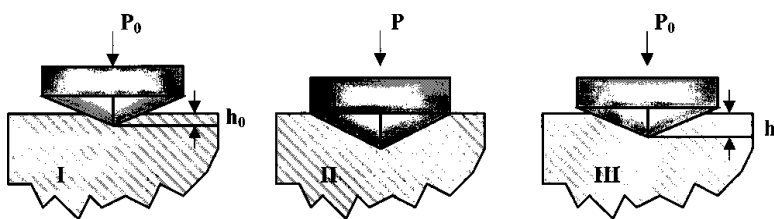


Рисунок 5 - Схема измерения твердости по Роквеллу [4]

вибраций и тонкого поверхностного слоя. Под нагрузкой P_0 индентор погружается на глубину h_0 , затем на образец подается полная нагрузка $P=P_0+P_1$ и глубина вдавливания

увеличивается (рисунок 5, II). Глубина вдавливания h после снятия основной нагрузки, когда на индентор вновь действует только предварительная нагрузка P_0 (рисунок 5, III), определяет число твердости по Роквеллу HR.

При использовании в качестве индентора алмазного конуса твердость по Роквеллу определяют по двум шкалам - А и С. При измерении по шкале А: $P_0=98$ Н, $P_1=490$ Н, по шкале С: $P_0=98$ Н, $P_1=1372$ Н. Число твердости здесь выражается формулой

$$\text{HRC(HRA)}=100-r, r=(h-h_0)/0,002, \quad (8)$$

где 0,002 - цена деления шкалы индентора Роквелла.

Единица твердости по Роквеллу - безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм. При использовании в качестве индентора стального шарика число твердости HRB определяется по шкале В, т.е. при $P_0=98$ Н и $P_1=882$ Н, тогда $P=980$ Н и

$$\text{HRB}=130-r. \quad (9)$$

Числа твердости по Роквеллу записываются также как и HB и HV: HRC65, HRB30, HRA90 и т.д. Требования к поверхности образцов примерно такие же, как и при определении твердости по Виккерсу. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков или от центра какого-либо отпечатка до края образца должно быть не менее 3 мм. Минимальная толщина образцов зависит от твердости материала и должна быть не менее восьмикратной глубины вдавливания.

3 Определение твердости в реальном эксперименте

Цель работы: изучение принципа действия работы твердомера и определение с его помощью твердости различных материалов.

Оборудование: твердомеры ТП-2 и ТШМ-2, металлические и керамические образцы, линейка, карандаш, оптический микроскоп, объект-микрометр.

Начало работы состоит в изучении устройства и принципов действия прибора, а также правил техники безопасности при проведении конкретного эксперимента. Перед получением первичных измерений необходимо обсудить план эксперимента с преподавателем.

Результаты работы должны быть представлены в виде графиков, таблиц или диаграмм и содержать анализ погрешностей и эффективности использованного метода исследования.

Отчет по работе должен содержать:

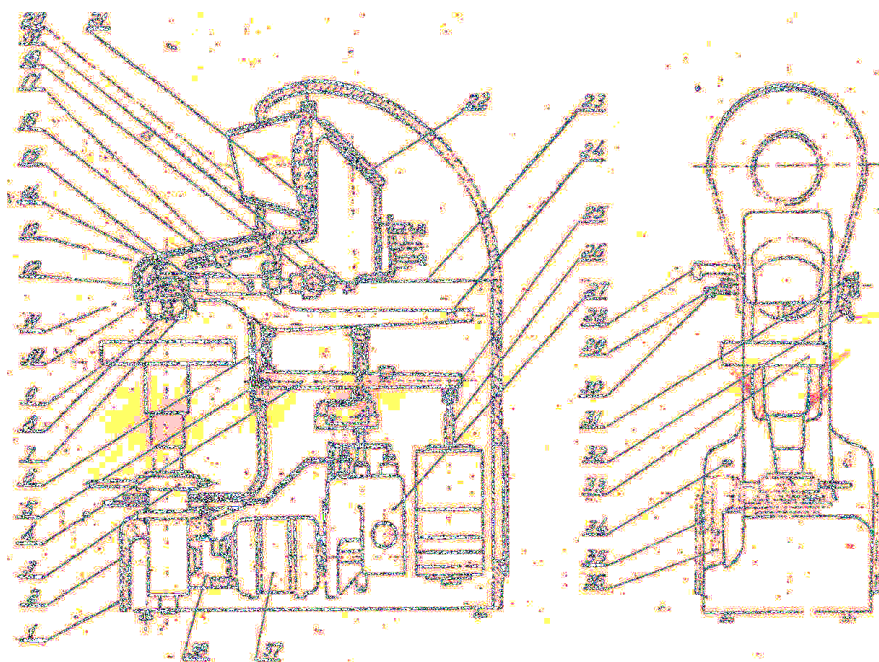
- название работы;
- краткий конспект теории;
- принципиальную схему прибора;
- методику эксперимента;
- вычисления расчетных величин и обработку результатов;
- анализ достоинств и недостатков использованного метода.

Защита лабораторной работы проходит во время личного собеседования с преподавателем.

3.1 Принцип действия и краткое описание твердомера ТП-2

Прибор ТП-2 предназначается для определения твердости материалов по методу Бринелля и Виккерса. Прибор предназначен для определения твердости изделий с цилиндрической и плоской поверхностью, а также изделий с внутренней цилиндрической поверхностью диаметром свыше 130 мм (без снятия чехла). В конструкцию прибора входят следующие основные механизмы, смонтированные внутри литой станины 1 (рисунок б):

- а) рычажное устройство для создания испытательной нагрузки с установленным на нем наконечником и объективом;
- б) отсчетное устройство, включающее отсчетный механизм, призму Довэ, ахроматическую линзу и два зеркала, служащих для проектирования отпечатка на матовый экран прибора;
- в) механизм подъема стола со сменными столами для установки испытуемого изделия;
- г) механизм нагружения с электродвигателем переменного однофазного тока на 220 В;
- д) механизм поворота головки, служащий для переключения объектива и наконечника в рабочее положение;
- е) лампа и патрон от осветителя ОИ-19;
- ж) подвеска с грузами;



1-станина прибора; 2-клавиша; 3-гайка подъема винта; 4- рычаг нижний; 5-призма; 6-тяга; 7- упор; 8 - объектив; 9- наконечник испытательный; 10-рычаг верхний; 11-головка поворотная; 12- зеркало светодетельное; 13-зеркало осветителя; 14 - чехол защитный; 15 -призма Довэ; 16- линза ахроматическая; 17-лампа осветителя; 18 - окуляр-микрометр; 19 -зеркало малое регулируемое; 20 -козырек; 21-экран; 22 - зеркало большое; 23 -шток; 24- микропереключатель; 25 -серьга; 26-подвеска; 27 - механизм привода; 28 -кнопка поворота призмы Довэ; 29 – винт окуляр-микрометра; 30-винт окуляр-микрометра; 31-винт окуляр-микрометра; 32-ручка поворота головки; 33 -стол; 34-лампа сигнальная; 35-тумблер; 36- игла регулирования выдержки 37 - электродвигатель; 38 - панель электрооборудования

Рисунок 6 – Рабочая схема твердомера ТП-2

з) панель с электроаппаратурой.

Испытательные нагрузки создаются с помощью системы, состоящей из основного верхнего рычага 10 и соединенного с ним тягой 6 вспомогательного рычага. Нагрузка, равная 5 Н, создается системой рычагов с установленной подвеской грузов 26. Нагрузки, превышающие эту величину, создаются установкой на подвеске соответствующего набора сменных грузов. Основные опоры рычагов выполнены на шарикоподшипниках, промежуточные опоры серег, связанные с тягой 6 - на призмах. Общее передаточное отношение рычажной системы равно 1:10. При повороте головки 11 в положение измерения автоматически загорается лампочка осветителя 17. Электродвигатель 37 привода работает периодически. О продолжительности выдержки под полной нагрузкой сигнализирует лампочка 34, установленная на корпусе прибора и включающаяся от рычажной системы.

На приборе не разрешается испытывать:

- а) неоднородные по структуре материалы;
- б) хрупкие изделия и изделия, имеющие на поверхности раковины, следы грубой обработки и другие дефекты;
- в) изделия, которые могут пружинить под действием приложенной испытательной нагрузки (например, тонкостенные трубы).

Для проведения линейных измерений или измерений площадей участков следует пользоваться окуляром со сменной сеткой (или шкалой) и диоптрийной наводкой, который входит в комплект к микроскопу. Для этого окуляр следует вставить в одну из окулярных трубок микроскопа, вращая диоптрийное кольцо, добиться резкого изображения сетки или шкалы. Поворотом рукояток механизма фокусировки микроскопа необходимо получить резкое изображение объекта.

Ниже помещена переводная таблица 2, в которой указано, какой истинной величине объекта соответствует одно деление шкалы или сетки при всех увеличениях микроскопа. Чтобы определить истинные размеры объекта (линейные размеры или площадь), достаточно подсчитать число делений шкалы, которое укладывается в измеряемый участок объекта, и это число умножить на число,

указанное в таблице, соответствующее увеличению микроскопа, при котором производится измерение. Шкала и сетка представляют собой стеклянные плоскопараллельные пластины круглой формы. Цена деления шкалы 0,1 мм. Цена деления стороны квадрата сетки 1 мм. Шкала обычно вставлена в оправу окуляра 8^x с диоптрийной наводкой, сетка, как правило, прилагается в комплекте к оптическому микроскопу.

Таблица 2 – Переводная таблица

Увеличение на шкале рукояток	1 деление шкалы 0,1мм	Сторона квадрата 1 мм
0,6	0,17	1,7
1	0,1	1,0
2	0,05	0,5
4	0,025	0,25
7	0,014	0,14

Подготовка к работе. Поверхность испытуемых образцов должна быть сухой и чистой. Краска, гальванические покрытия, окалина, обезуглероженные или цементированные слои должны быть удалены, если основной целью не является испытание данного слоя. Испытуемая поверхность должна быть установлена перпендикулярно к оси наконечника. Толщина образца должна быть в 2 раза больше диагонали отпечатка, т.е. свыше 0,15 мм. При исследовании тонких образцов необходимо, чтобы их опорная поверхность была в полном соприкосновении с поверхностью испытательного столика.

В качестве испытательных материалов используют стальной и керамический образцы.

Сталь представляет собой твердый раствор углерода (около 2%) в железе. Иногда для повышения эксплуатационных характеристик в сталь добавляют доли процентов хрома, никеля и т.д. Железа содержится более чем 95%.

Керамические образцы на 90 % состава по массе состоят из кристаллических

фаза: оксидов алюминия, кремния и т.д. Керамические образцы получены вакуумным прессованием и высокотемпературным обжигом для получения возможно низкой пористости.

Перед проведением испытания следует в зависимости от характера изделия выбрать величину испытательной нагрузки. При испытании термически обработанных изделий во избежание поломки алмазного индентора не следует применять нагрузку, превышающую 50 кгс (490 Н).

3.2 Порядок выполнения работы

На всех образцах рекомендуется начертить мягким карандашом тонкую линию, вдоль которой будут получены отпечатки индентора. Это необходимо сделать для того, чтобы при работе с оптическим микроскопом можно было их легко найти.

1. Для определения твердости по методу Бринелля необходимо включить прибор в сеть. Поворотом ручки 32 индентор установить в рабочее положение.

2. На столе прибора установить образец, подводя ее к упору вращением рукоятки гайки 3 подъемного винта. Зазор между ней и наконечником должен быть (0,05...0,15) мм.

3. Пусковой клавишей 2 включить привод прибора, автоматически осуществляющий установленный цикл нагружения, с окончанием цикла нагружения гаснет сигнальная лампочка.

4. После окончания нагружения столик опустить на 1-2 мм для свободного перемещения образца. Выбрать следующее место для укола, повторить пункты 2, 3. Всего следует сделать 5 отпечатков на каждом образце.

5. Определить увеличение микроскопа МБС-9 или другого оптического микроскопа (приложение А) и цену деления встроенной в окуляр сетки. При этом отпечаток должен занимать около половины поля зрения. Далее, по встроенной сетке (или шкале) определить длину двух взаимно-перпендикулярных диаметров каждого отпечатка, найти для них среднее. Данные по всем пяти отпечаткам заносят

в таблицу.

6. Подставить средние значения диаметров d отпечатка в формулу (6), определить твердость металлической пластины НВ, погрешность измерений и указать доверительный интервал НВ.

7. Повторяя пункты 3-7, найти значения НВ для керамического образца, указать погрешность измерений, доверительный интервал, заполнить таблицу 3.

Таблица 3 – Таблица экспериментальных данных

№	$d_1,$ мм	$d_2,$ мм	$d=(d_1+d_2)/2,$ мм	НВ, кгс/мм ²	НВ, Н/мм ²	$\varepsilon,$ %
<i>Металлический образец</i>						
1						
...						
5						
Ср.	-	-	-			
<i>Керамический образец</i>						
1						
...						
5						
Ср.	-	-	-			

8. Сделать выводы по проделанной работе, сравнив полученные значения со справочными данными, приведенными в таблицах В.1, В.2.

4 Определение твердости методом Бринелля в виртуальном эксперименте

Цель работы: расчет твёрдости конструкционных сплавов методом Бринелля

Работа проводится с помощью имитационной программы, которая моделирует работу прессы Бринелля для определения твердости материалов.

На рисунке 7 представлена экранная форма основного окна программы. На экранной форме расположен твердомер Бринелля, пульт управления, при помощи которого запускается пресс, и микроскоп, с который позволяет рассмотреть отпечаток и измерить его диаметр. В нижней части окна расположен выпадающий список с конструкционными материалами, твердость, которых необходимо определить в ходе работы.

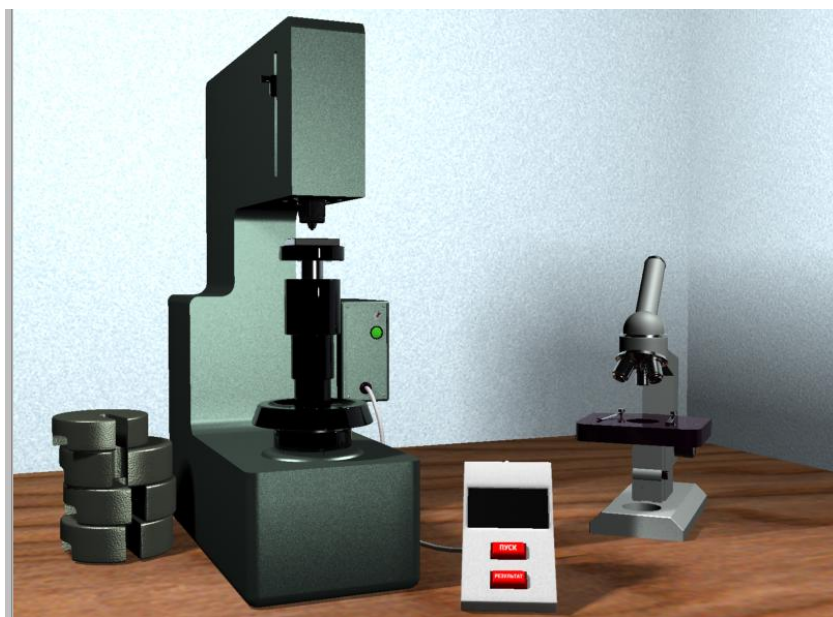


Рисунок 7 – Экранная форма программы

В лабораторном стенде установлена нагрузка 3000 Н, диаметр шарика 10 мм.

4.1 Порядок выполнения работы

- 1 Запустить файл Project1.exe.
- 2 Выбрать материал образца.
- 3 Нажав кнопку «Пуск» на пульте управления, «запустить» виртуальный твердомер.
- 4 После остановки прессы подвести курсор к предметному столику микроскопа и выбрать «Исследовать под микроскопом». На экране появится

изображение образца с отпечатком в виде шарового сегмента.

5 Замерить диаметр отпечатка в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определить среднеарифметическую длину диагонали;

6 Подсчитать число твёрдости по формуле (7).

7 Сравнить число твердости по показаниям твердомера.

8 Данные занести в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты вычислений твёрдости

Материал	D шара, мм	d отп, мм	P,кг	Твердость по формуле, кг/мм ²	Твердость по показаниям, кг/мм ²
Образец 1					
Образец 2					
Образец 3					

5 Контрольные вопросы

1. Общие требования, предъявляемые к конструкционным материалам.
2. Механические свойства материалов.
3. Тепловые свойства материалов.
4. Металлические конструкционные материалы.
5. Неметаллические конструкционные материалы.
6. Методы определения твердости, их особенности.

Список использованных источников

1. Материаловедение: учеб. Для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 5-е изд., стер. - М.: Альянс, 2009. – 528 с. - Предм. указ.: с. 521-523. - Библиогр. : с. 520. - ISBN978-5-903034-66-6.

2. Гуревич, А.Г. Физика твердого тела / А.Г. Гуревич. - Санкт-Петербург:

Невский диалект, 2004. - 320 с.

3. Журавлева, Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – Москва: Academia, 2004. – 312 с.

4. Тушинский, Л.И. Методы исследования материалов / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. – Москва: Мир, 2004. - 384 с.

5. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учеб. для вузов. В 2-х томах. Т.1. Элементы теоретических основ материаловедения и технологии получения материалов / А. В. Шишкин, В. С. Чередниченко, А. Н. Черепанов, В. В. Марусин. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 448 с.

6. Платунов, Е. Физика. Словарь – справочник / Е. Платунов, В. Самолетов, С. Буравой. - Санкт-Петербург: Питер, 2005. - 496 с.

7. Болтон, У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник. 3-е изд., стер. / Пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2009. – 320 с.

8. Заводская лаборатория. Диагностика материалов : журнал . - М. : Агентство "Роспечать", 2016.

9. Головин, Ю.И. Наноиндентирование и его возможности [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва : Машиностроение, 2009. — 312 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/730>. — Загл. с экрана.

10. Целебровский, Ю.В. Материаловедение для электриков в вопросах и ответах / Ю. В. Целебровский. - Новоси�.: НГТУ, 2016. - 64 с.: ISBN 978-5-7782-1309-8.

11. Институт физики прочности и материаловедения Сибирское отделение Российской академии наук (ИФПМ СО РАН © 2008 – 2018). Режим доступа: <http://www.ispms.ru/ru/production/>

Приложение А (обязательное)

Увеличение и разрешающая способность оптического микроскопа

Выбранный участок объекта в микроскопе увеличивается дважды – окуляром и объективом, поэтому общее увеличение N определяется формулой:

$$N=N_{об} \cdot N_{ок}=250 \cdot L / f_{об} \cdot f_{ок},$$

где $f_{об}$ и $f_{ок}$ – фокусное расстояние объектива и окуляра, мм,

L – оптическая длина тубуса, мм,

250 мм – расстояние наилучшего зрения глаза человека.

Основное увеличение достигается объективом (до 100 раз), увеличение окуляров обычно не превышает 20 раз.

Кроме увеличения существует еще одна важная характеристика изображения – это его качество, которое определяется пределом разрешения прибора и глаза человека. Предел разрешения - это наименьшее расстояние между точками, которое может различить оптическое устройство. Человеческий глаз имеет предел разрешения от 0,1 до 0,3 мм.

Полезное увеличение и предел разрешения микроскопа определяются выражениями:

$$M=\beta_{гл}/\beta_{мик}, \beta_{мик}=0,61 \cdot \lambda / n \cdot \sin \alpha,$$

где λ – длина волны света, используемого для получения увеличенного изображения (для видимого света $\lambda \approx 0,6$ мкм),

n – показатель преломления (для воздуха $n=1$),

α – апертурный угол (максимальное значение $\alpha=90^0$).

Тогда максимальное разрешение микроскопа $\beta_{мик}=0,61 \cdot 0,6 \approx 0,36$ мкм, а

максимальное полезное увеличение $M \approx 1000$ раз. Обычно используют увеличение в пределах от 200 до 600 раз.

Для более точного определения масштаба увеличения пользуются объект-микрометром (полупрозрачной линейкой с ценой деления $C_0 = 0,01$ мм).

При исследовании рельефных структур применяют метод косо́го освещения, когда для передачи изображения используются преимущественно косые, непараллельные оси микроскопа лучи. Если исследуемый объект имеет фазы, различающиеся по рассеивающей способности (неметаллические включения в металле, поры в керамике, трещины), то применяют метод темнопольного освещения. При этом в формировании изображения структуры прямые лучи не участвуют и создается контраст, обратный светлопольному. Отполированная поверхность шлифа выглядит темной, а участки, вызывающие рассеивание света, выглядят яркими.

Необходимо грамотно пользоваться фильтрами и диафрагмами. Объективы даже при хорошей коррекции при использовании белого света дают изображение с нерезкими окрашенными контурами, особенно по краю. Для снижения эффекта используют желто-зеленый фильтр. Для усиления контрастности изображения на фотопластинке используют синий фильтр, так как светочувствительный слой особенно восприимчив к синему цвету.

Приложение Б *(обязательное)*

Приготовление шлифов

Плоскую поверхность образца шлифуют на абразивных бумагах (шкурках) с зернами различных размеров (номеров). Шлифование начинают на шкурке с более крупным абразивным зерном, а затем – с более мелкими. На каждой шкурке образец шлифуют только в одном направлении, до полного исчезновения рисок (царапин), полученных на предыдущей шкурке в поперечном направлении. После каждой шкурки образец промывают или очищают от абразива.

Для получения более ровной поверхности используют дополнительно специальные пасты (алмазные, паста ГОИ и т.д.), сукно, плотную бумагу.

Для механической полировки используют очень мелкий абразив, нанесенный в виде суспензии или пасты на специальные ткани. Используют также химическую или электролитическую полировку.

Приложение В (обязательное)

Механические свойства современных конструкционных материалов [1]

Таблица В.1 – Механические свойства сталей, сплавов и пластмасс

Материал	Прочность на изгиб, МПа	Пластичность, %	Твердость	Модуль упругости, ГПа
Стали	с высокой плотностью			
Хромистая 20Х	800	11	131 (НВ)	210
Хромоникелевая 12ХН3А	950	11	200 (НВ)	200
Хромоникелемолибденовая 18Х2Н4МА	1150	12	270 (НВ)	220
Сплавы	пластичные, средней прочности			
Титановый ВТ5	800	10		120
Дуралюмин	320	15		65
Магнийевый МЛ5	220	5		70
Латуни	450	20	70 (НВ)	80
Бронзы	600	40	110 (НВ)	110
<i>Композиты</i>	1300	-	220 (НВ)	220
Пластмассы	пластичные, легкоплавкие			
Фторопласт	60	до 100	130 (НВ)	1
Органическое стекло	100	20	200 (НВ)	3
Гетинакс	80	1-3		100
<i>Резины</i>	30	800		0.001

Таблица В.2 – Механические свойства керамических материалов

Керамики	Прочность на сжатие, МПа	Микротвердость, кг/мм ²	Твердость	Модуль упругости МПа
<i>пористые, хрупкие, твердые, с низкой плотностью</i>				
Карбид вольфрама WC	2500		близко к алмазу	600
Карбид кремния SiC	650	940 кг/мм ²	120 (HRC) 2300 (Hv)	400
Нитрид кремния Si ₃ N ₄	800	800	80 (HRC) 1800 (Hv)	450
Стекло (аморф. SiO ₂)	100	100 кг/мм ²		72
Электрофарфор	50	500 кг/мм ²		70
Строительный кирпич	10		40 (HRC)	15
Бетон	20		400 (HRC)	20

П р и м е ч а н и я:

1 1 килограмм – сила (кГс) = 9,81 Н

2 1 кгс/м² = 9,81 Па

3 1 кгс·м = 9,81 Дж