

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Калужский филиал
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования
«Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Н.С. Герасимова, Ю.Г. Головачева

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЁРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Материаловедение»

Калуга
2019 г.

УДК 669.01

ББК 30.3

Г 37

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом
для всех специальностей.

Методические указания рассмотрены и одобрены:

кафедрой «Материаловедение и химия» (М5-КФ)

протокол № 4 от «19» ноября 2019 г.
Зав. кафедрой Мещеряков д.т.н., профессор В.К. Шаталов

Методической комиссией факультета МКФ

протокол № 4 от «28» ноября 2019 г.

Председатель методической комиссии факультета М-КФ

Степанов к.ф.-м.н., доцент Степанов С.Е.

Методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

протокол № 3 от «3» декабря 2019 г.

Председатель метод. комиссии

Перерва д.э.н. профессор О.Л. Перерва

Рецензенты:

Мусохранов

доцент кафедры М1-КФ, к.т.н.

Мусохранов М.В.

Авторы:

Герасимова
Головачева

к.т.н., доцент Герасимова Н.С.

Ст. преподаватель Головачева Ю.Г.

Аннотация

В методическом указании рассмотрены основные механические свойства металлов и сплавов и способы их определения. Методические указания предназначены для студентов всех специальностей.

© КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019 г.

© Герасимова Н.С.

© Головачева Ю.Г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
СОДЕРЖАНИЕ	3
1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ	5
1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ	6
1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНОСТИ	11
1.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЯЗКОСТИ МАТЕРИАЛОВ	12
1.4. ТВЁРДОСТЬ МАТЕРИАЛА	15
2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЁРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	16
2.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ	18
2.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ	21
2.2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ	26
3. ЗАДАЧИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	28
4. ПРАВИЛА ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ	31
5. СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	33
6. ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	35
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	36
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	37

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и производстве машин, механизмов, инструментов те или иные детали должны обладать определенными механическими свойствами. Механические свойства металлов характеризуют сопротивление материала деформации и разрушению под действием внешних нагрузок. Практически все методы определения механических свойств являются разрушающими. Для проведения испытаний необходимы специальные машины, процессы испытания довольно длительны, особенно если учесть весьма продолжительный процесс изготовления специальных образцов.

Механические свойства и физические свойства зависят от многих факторов: от состава материала, вида обработки (пластической деформации, термической обработки). Поэтому в процессе изготовления тех или иных деталей необходимо контролировать свойства, особенно механические. Обычные методы испытания механических свойств не могут быть использованы на промежуточных стадиях изготовления деталей вследствие длительности и дороговизны изготовления образцов, длительности самого процесса испытания. В этом случае пользуются методами определения твердости.

Твердость имеет большое практическое значение, так как она отражает многие рабочие свойства материала, например, сопротивляемость истиранию, режущие свойства, способность обрабатываться шлифованием или резанием, выдерживать местные давления и т.д. Кроме того, по твердости можно судить и о других механических свойствах (например, о прочности на разрыв). Следовательно, между твердостью и другими свойствами материалов существует определенная связь, подтверждаемая практикой.

Широкое распространение испытаний материалов на твердость объясняется тем, что при этом не требуется изготовления специальных образцов; методика испытаний весьма проста и может осуществляться непосредственно на готовой детали без разрушения.

Цель работы: изучить основные методы измерения твёрдости металлов и сплавов, а также особенности их применения. Приобрести практические навыки работы с твердомерами различных систем.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ

Механические свойства - прочность, пластичность, упругость, вязкость, твердость, хрупкость - являются основными характеристиками конструкционных материалов, т.к. отражают способность материала (детали) сопротивляться воздействию внешних механических сил (нагрузок). Механические свойства определяют и технологичность материалов при обработке давлением, резанием и др.

Прочность - это способность материала сопротивляться деформации и разрушению под действием внешних нагрузок. Чем выше прочность материала, тем меньше могут быть рабочие сечения детали, тем больше экономия металла. Следует учитывать и конкретные условия эксплуатации детали, т.к. конструктивная прочность (проявляющаяся в эксплуатации) зависит не только от природы материала, т.е. сил межатомного взаимодействия, но и от вида напряженного состояния, окружающей среды, температурно-скоростных условий приложения и величины нагрузки и т.д. К тому же одновременно с ростом прочности материала зачастую повышается его хрупкость и чувствительность к концентраторам напряжения.

Важной практической характеристикой конструкционного материала является удельная прочность – отношение предела прочности материала к его плотности. Благодаря низкой плотности сплавам титана и алюминия может быть отдано предпочтение перед многими сталями в авиационной, ракетной технике и др.

Пластичность - это способность материала остаточно, не разрушаясь, изменять свою форму и размеры, под действием внешних сил.

Вязкость - способность материала, пластически деформируясь необратимо поглощать энергию внешних сил. Зная вязкость можно оценить склонность материала к переходу в хрупкое состояние.

Упругость - свойство твердого тела восстанавливать свою форму и объем после снятия нагрузки, вызвавшей деформацию. В конструкциях упругость проявляет себя в жесткости - способности сопро-

тивляться деформации. Жесткость является одной из важнейших практических характеристик, которая позволяет рассчитать деформацию детали (конструкции) с учетом согласованности деформации ее отдельных элементов под действием рабочей нагрузки. Жесткость конструкции определяется модулем упругости материала при растяжении, E (либо модулем упругости при сдвиге G), ее формой и размерами. Металлы обладают сравнительно высокой жесткостью, а пластмассы, даже армированные стеклопластики, имеют низкие значения E и G и их применение для изготовления конструкций большого размера ограничено.

Твердость - способность материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) определенной формы и размера. Как видно из определения, оно отражает не физический смысл понятия, а основные методы испытания. Выработка общего определения твердости как механического свойства затруднена разнообразием методов определения твердости и разным физическим смыслом чисел твердости. В разных методах и при разных условиях проведения испытаний числа твердости могут характеризовать: упругие свойства, сопротивление малым или большим пластическим деформациям, сопротивление материала разрушению.

Хрупкость - способность материала разрушаться под действием внешних сил практически без пластической деформации.

Определяют механические свойства материалов при проведении испытаний в исследовательских и заводских лабораториях при статическом или динамическом нагружении, при циклическом приложении нагрузки и др.

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ

Большинство технических характеристик **прочности** определяют в результате статического испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение. Растяжение - наиболее жесткая схема напряженного состояния. Испытания на растяжение позволяют по результатам одного опыта определить сразу несколько важных механических характеристик материала. Методы испытания на растяжение стандартизованы.

В отдельных стандартах сформулированы, определения характеристик, оцениваемых при испытании, даны типовые формы и размеры образцов, основные требования к оборудованию, методика испытания и расчета результатов.

При испытании на одноосное растяжение образец, закрепленный в захватах разрывной машины, деформируется при статической, плавно возрастающей нагрузке. В процессе этого испытания специальное устройство испытательной машины автоматически вычерчивает диаграмму, выражающую зависимость между растягивающей силой и абсолютным удлинением, т. е. в координатах $F - \Delta l$. Для изучения механических свойств материала независимо от размеров образца применяется диаграмма в координатах «напряжение - относительное удлинение» $\sigma - \varepsilon$. Эти диаграммы отличаются друг от друга лишь масштабами. Для такого перехода используют следующие соотношения:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

где F - приложенная нагрузка; S_0 - начальная площадь поперечного сечения образца, ε - относительное удлинение, l_0 - начальная длина образца; Δl - абсолютное удлинение.

На рис.1. представлена диаграмма растяжения для образцов, разрушающихся после образования шейки в результате сосредоточенной деформации.

По координатам характерных точек диаграммы можно рассчитать различные прочностные характеристики,

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S_0}, \quad \left(\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} = 10 \text{ МПа} \right) \quad (2)$$

где F_i - приложенная нагрузка; S_0 - начальная площадь поперечного сечения образца.

На начальном участке диаграммы, до точки "В", материал испытывает только **упругую деформацию**, которая полностью исчезает после снятия нагрузки. В области упругой деформации до точки "А" деформация пропорциональна нагрузке или действующему напряже-

нию $\frac{F}{S_0}$. Нагрузке в точке "А", определяющей конец прямолинейного участка диаграммы растяжения, соответствует предел пропорциональности $\sigma_{nc} = \frac{F_{nc}}{S_0}$. До точки "А" справедлив закон Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$,

где $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$ - относительная деформация; Δl - абсолютное удлинение; l_0 - начальная длина образца. Коэффициент пропорциональности E характеризует упругие свойства материала - это модуль нормальной упругости $E = \frac{1}{\alpha} \cdot \tan \alpha$. При заданном напряжении с увеличением E уменьшается ε , т.е. возрастает жесткость конструкции.

Значение E зависит от сил межатомного взаимодействия и меняется незначительно при изменении состава сплава, структуры, термической обработки. Например, для различных углеродистых и легированных сталей $E = 210$ МПа независимо от вида предшествующей обработки.

Координата точки "В" на диаграмме (рис. 1) определяет теоретический предел упругости материала $\left(\sigma_{yn} = \frac{F_{yn}}{S_0} \right)$, т.е. максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию. Практически, из-за трудности определения σ_{yn} , используют условный предел упругости, под которым понимают напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,005 ÷ 0,01% от начальной длины образца. В обозначении условного предела упругости указывают значение остаточной деформации (например $\sigma_{0,005}$, $\sigma_{0,01}$).

На участке диаграммы правее точки "В" (рис.1) материал испытывает **пластическую деформацию**. В зависимости от природы материала различают физический предел текучести $\left(\sigma_T = \frac{F_{0,2}}{S_0} \right)$, когда характерно наличие площадки

текучести и условный предел текучести $\left(\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0} \right)$, когда площадки нет (рис. 1).

Условный предел текучести, напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2% от начальной длины образца. Таким образом, предел текучести - физический и условный - характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям.

Заметим еще, что площадка текучести есть у сравнительно немногих материалов – *малоуглеродистой стали, латуни и некоторых марганцевых и алюминиевых бронз*. Большинству металлов свойственен постепенный переход в пластическую область.

При дальнейшем нагружении, правее точки "С" (рис.1), пластическая деформация увеличивается, равномерно распределяясь по всему объему образца. В точке "D" (рис. 1), макроравномерность пластической деформации нарушается. В какой-то части образца, обычно вблизи концентратора напряжений, который уже был в исходном состоянии или образовался при растяжении (чаще всего в середине расчетной длины), начинается локализация деформации. Ей соответствует местное сужение поперечного сечения образца - образование шейки. Напряжение в этот момент испытания называют временным сопротивлением разрыву, оно соответствует максимальной нагрузке,

которую выдерживает образец до разрушения: $\sigma_e = \frac{F_{\max}}{S_0}$. По физическому смыслу σ_e - это условное напряжение, характеризующее сопротивление максимальной равномерной деформации. За точкой "D" идет развитие шейки вплоть до разрушения, в точке "E".

Истинное сопротивление разрушения - это максимальное напряжение, которое выдерживает материал в момент, предшествующий разрушению образца и определяется как отношение усилия в момент разрушения к минимальной площади поперечного сечения образца в месте разрыва.

Таким образом, важнейшие показатели прочностных свойств, определяемые при статическом испытании на растяжение:

а) *сопротивление упругой деформации*, характеризующееся $\sigma_{yn}; \sigma_{0,005}; E$.

б) *сопротивление пластической деформации*, характеризующее-

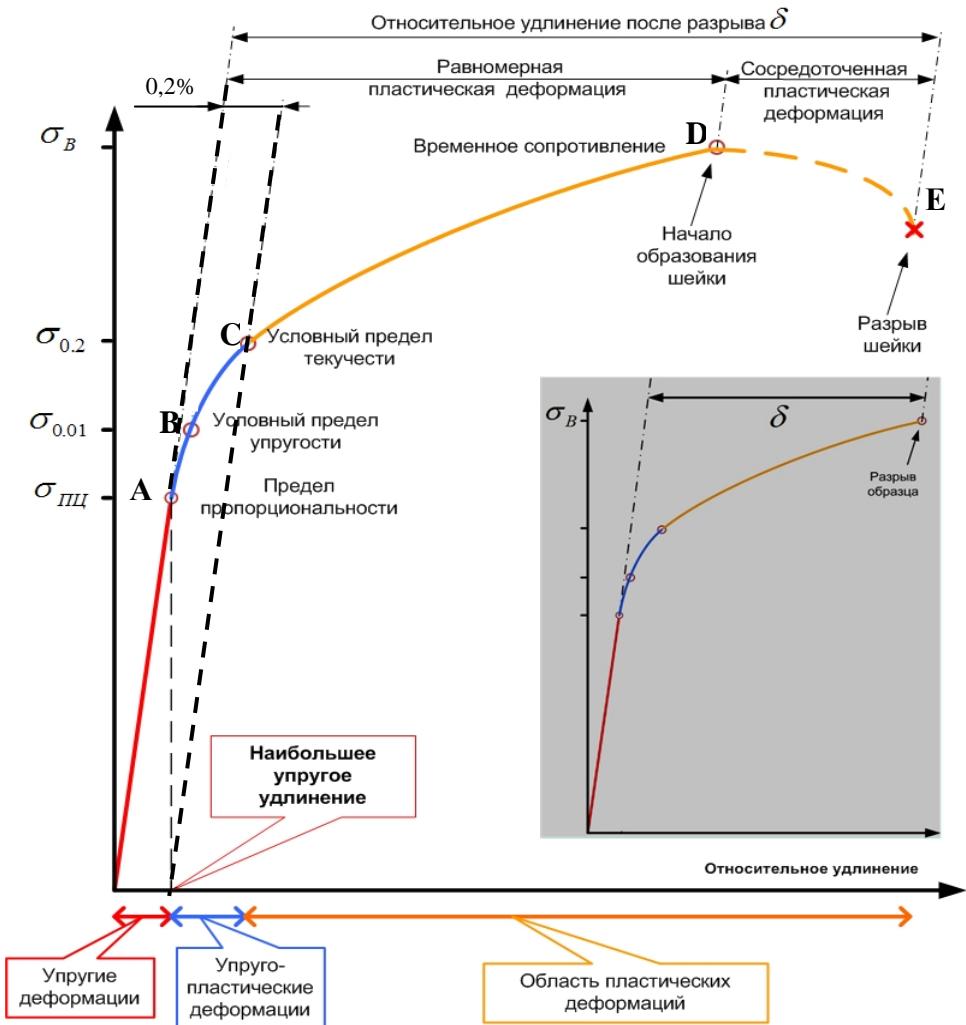


Рис.1. Диаграмма растяжения
 Основной рисунок – растяжение с образованием шейки,
 на вставке – растяжение без образования шейки

ся σ_T ; $\sigma_{0,2}$; σ_b .

Определение прочностных характеристик материалов, хрупко разрушающихся при растяжении, проводят при испытании на изгиб или сжатие, т.е. при более мягкой схеме нагружения.

1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Основные характеристики пластичности при испытании на растяжение - относительное удлинение δ и относительное сужение ψ .

Относительное удлинение, величина относительной пластической деформации, предшествующей разрушению; рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\% , \quad (3)$$

где l_0 и l_k - начальная и конечная длина образца; Δl - абсолютное удлинение.

Классификация материалов по остаточному удлинению:

- *пластичные* $\delta \geq 10\%$;
- *малопластичные* $5\% < \delta < 10\%$;
- *хрупкие* $\delta \leq 5\%$.

Относительное сужение, ψ , как и δ , представляет собой относительную пластическую деформацию, предшествовавшую разрушению, а оценивается как относительное изменение поперечного сечения образца по формуле:

$$\psi = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100\% , \quad (4)$$

где S_0 - начальная площадь поперечного сечения; S_k - площадь поперечного сечения "шейки" после разрыва.

Используются и другие характеристики пластичности материалов. Например, число перегибов до разрушения и др. Ни один из показателей пластичности не является универсальным. Величина δ - лучшая характеристика в процессах с преобладанием деформации растя-

жения.

Характеристики пластичности часто связаны с прочностными свойствами. При достаточно высоких значениях относительного удлинения и сужения $\left[10 \div 20\% \right]$ прочность обычно тем меньше, чем выше пластичность. Но переход к хрупкому разрушению сопровождается, как правило, снижением прочностных свойств.

1.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЯЗКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Вязкость материала зависит от структуры, наличия примесей, образующих хрупкие избыточные фазы, а также от условий работы. В зависимости от температуры эксплуатации, скорости нагружения, наличия концентратора, вида напряженного состояния, масштабного фактора один и тот же материал будет в пластичном состоянии, либо перейдет в хрупкое состояние.

Вязкость оценивается ударной вязкостью, численно равной работе разрушения A стандартного образца к площади его поперечного сечения в месте надреза F_0 . Это сложная комплексная характеристика, зависящая от совокупности прочностных и пластических свойств.

$$KC = \frac{F}{S_0} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{см}^2} \right)$$

Определяется ударная вязкость при динамических испытаниях на маятниковых копрах специально подготовленных образцов с предварительно нанесенным надрезом (рис. 2). Образец устанавливают на опорах копра и наносят удар по стороне образца, противоположной надрезу. Работа, затраченная на разрушение образца, определяется так:

$$A = mg(H - h) = mgl(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

где m - масса маятника; g - ускорение силы тяжести; H , h - высота подъема маятника до удара и после разрушения образца; l - длина маятника; α_2 , α_1 углы подъема маятника до удара и после разрушения образца.

Испытания проходят при работе удара на копре с максимальной энергией удара маятника 30 кгс·м ($\approx 29,4$ Дж), при глубине concentra-

тора 2 мм для концентраторов видов U и V и 3 мм для концентратора типа T и ширине образца 10 мм. Обозначают ударную вязкость буквами *KCU*, *KCV*, *KCT*. Первые две буквы - *KC* - обозначают символ ударной вязкости, третья буква *U*, *V*, *T* – вид концентратора (рис. 3).

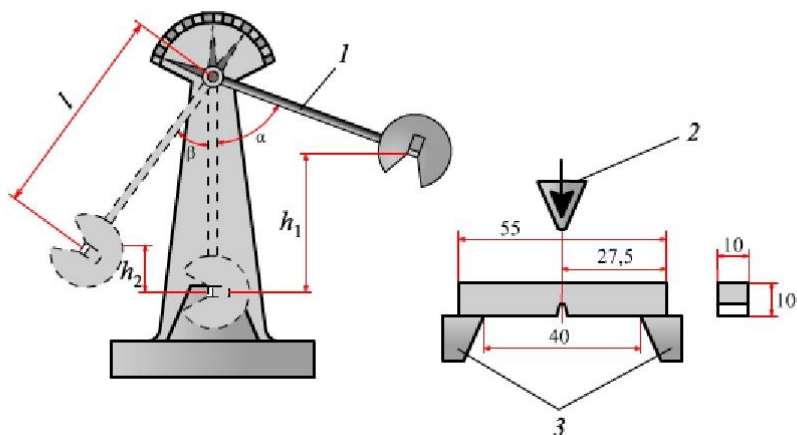


Рис.2. Испытания металла на ударную вязкость: 1- маятник; 2 – нож; 3 – опоры; а)- U-образный образец для испытания на удар

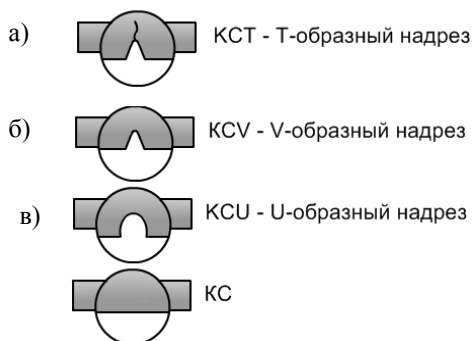


Рис. 3. Образцы для испытаний на удар:
a – образец с трещиной;
б – V-образный надрез;
в – U-образный надрез.

Для одного и того же материала $KCU > KCV > KCT$, т. е. чем острее надрез, тем легче разрушается материал. Ударная вязкость тоже является критерием надежности материала, гарантией, что он не будет разрушаться хрупко, внезапно.

Стали, применяемые для изготовления деталей, работающих при динамических нагрузках, должны иметь ударную вязкость не менее $8 \cdot 10 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{м}^2$.

Высокая ударная вязкость (более $20 \div 80 \text{ Дж}/\text{см}^2$ у разных групп сплавов) характерна для чистых по примесям, высокопластичных металлов, однофазных сплавов, и гетерогенных по структуре сплавов с небольшим количеством избыточных фаз или оптимальным их распределением. Легирование, увеличение размера зерна уменьшает ударную вязкость.

Испытания на ударную вязкость используют для определения хладноломкости, т.е. перехода материала из вязкого в хрупкое состояние при пониженных температурах. Температура, при которой резко падает ударная вязкость, а в изломе 50% вязкой составляющей, называется температурным порогом хладноломкости материала $\left(T_{50} \right)$.

Для применяемых материалов T_{50} должен быть ниже температуры эксплуатации детали, т.е. необходим температурный запас вязкости. Для надежной работы температурный запас вязкости должен быть 40° . В справочной литературе часто приводится температура верхнего $\left(T_B \right)$ и нижнего порога хладноломкости $\left(T_H \right)$. T_B соответствует температуре, при которой в изломе 90% вязкой составляющей, а при T_H в изломе 90% хрупкой составляющей (рис. 4).

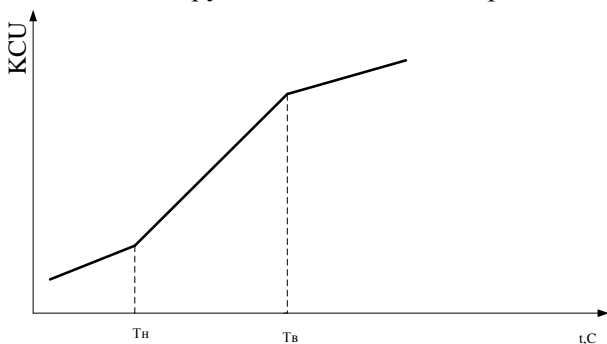


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости от температуры испытания

1.4. ТВЁРДОСТЬ МАТЕРИАЛА

Твердость материала определяют при помощи воздействия на поверхность образца или детали наконечника (индентора), изготовленного из малодеформирующегося материала и имеющего форму шарика, конуса, пирамиды или иглы. Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия индентора. Твердость можно измерять вдавливанием индентора, царапанием поверхности, ударом или по отскоку индентора-шарика. Твердость, определенная царапанием, характеризует сопротивление разрушению; твердость, определенная по отскоку, характеризует упругие свойства; твердость, определенная вдавливанием - сопротивление пластической деформации. В каждом методе свое обозначение числа твердости.

Наиболее широко распространены методы, в которых используется статическое вдавливание индентора нормально поверхности образца. При вдавливании индентора в поверхностном слое образца под индентором возникает сложное напряженное состояние, близкое к объемному сжатию, которое характеризуется наибольшим коэффициентом жесткости по сравнению с другими видами испытаний. Поэтому возможно получение "пластических" состояний, исключение разрушения и оценка твердости практически любых, в том числе и хрупких металлических материалов.

Широкое применение методов объясняется:

- 1) их простотой;
- 2) высокой производительностью;
- 3) отсутствием разрушения образца, детали;
- 4) возможностью оценки свойств отдельных структурных составляющих и тонких слоев;
- 5) существующей связью между твердостью и важнейшими механическими и технологическими свойствами.

Величина твердости линейно связана с прочностью достаточно пластичных металлов и сплавов. Для конструкционных сталей, например, эмпирически установлено соотношение: $\sigma_b = kHB$, где

HB - твердость материала, k - постоянная;

$k \approx 0,36$ при $HB > 1750$ МПа;

$k \approx 0,34$ при $HB < 1750$ МПа;

Подобная количественная зависимость не наблюдается для хрупких материалов, которые при испытании на растяжение (или изгиб, кручение, сжатие) разрушаются без заметной пластической деформации. В ряде случаев, однако, и для таких материалов (например, серых чугунов) наблюдается качественная зависимость между пределом прочности и твердостью; возрастанию твердости обычно соответствует рост предела прочности на сжатие. По значению твердости можно определить и некоторые пластические свойства. Твердость, определенная вдавливанием, характеризует также предел выносливости некоторых металлов, в частности меди, дуралюмина и сталей в отожженном состоянии.

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЁРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Под твёрдостью понимают свойство поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твёрдого тела (индентора) определённой формы и размеров.

Разнообразие применяемых методов и разный физический смысл числа твёрдости затрудняют выработку общего определения твердости как механического свойства. В разных методах и при различных условиях проведения испытаний числа твёрдости могут характеризовать упругие свойства, сопротивление малым и большим пластическим деформациям, сопротивление материала разрушению.

По широте применения испытания на твёрдость, особенно при комнатной температуре, конкурируют с наиболее распространёнными испытаниями на статическое растяжение. Это объясняется простотой и высокой производительностью, отсутствием разрушения образца, возможностью оценки свойств отдельных структурных составляющих и тонких слоев на малой площади, легко устанавливаемой связью результатов определения твёрдости с данными другими испытаний. Так, например, по значению твёрдости металла или изделия из него можно с достаточной для практики достоверностью установить предел прочности на растяжение, а также косвенно судить об износостойкости, упругих свойствах, структуре материала, его технологических свойствах и т.д.

Наибольшее применение нашли три основных метода определе-

ния твёрдости, основанные на статическом вдавливании индентора: *метод Бринелля, метод Роквелла и метод Виккерса*.

Метод Бринелля применим лишь для определения твёрдости, не превышающей 450 кгс/мм², так как в качестве индентора используется стальной закалённый шарик. Особенностью этого метода является возможность определения твёрдости при пластическом деформировании достаточно больших, по сравнению с другими методами, объёмов металла и получение благодаря этому усреднённой характеристики твёрдости. Усреднённая характеристика твёрдости таких заготовок как отливки, поковки и прокат особенно важна для оценки их технологичности при обработке на металлорежущих станках. К недостаткам метода следует отнести низкую точность измерения размеров отпечатков, оставляемых индентором на испытуемой поверхности, и солидную величину самих отпечатков (как правило, диаметр отпечатков составляет несколько миллиметров).

Признание, которое получил метод **Роквелла** определяется тем, что он позволяет получить числовое значение твёрдости испытуемого изделия в несколько раз быстрее, чем два других метода. Высокая производительность метода Роквелла обусловлена тем, что измерение твёрдости сводится к определению глубины отпечатка, причём операция измерения твёрдости сводится к определению глубины отпечатка, при этом операция измерения совмещена по времени с процессом приложения испытательной нагрузки. При этом происходит малая повреждаемость поверхности. К недостаткам относят то, что образцы для испытаний должны быть не горячими (~ 30-40 °С).

Метод вдавливания алмазной пирамиды (**метод Виккерса**) является самым точным и универсальным. Его используют для контроля твёрдости ответственных деталей, при проведении исследовательских работ и т.д. Благодаря применению малых нагрузок, этот метод может быть использован для контроля твёрдости тонких изделий и вообще изделий малых размеров. Недостаток метод Виккерса - длительность процесса испытания, связанная с необходимостью измерения отпечатка с помощью микроскопа.

Во всех методах испытания на твёрдость очень важно правильно подготовить поверхностный слой образца. Он должен по возможности полно характеризовать испытуемый металл. Все поверхностные дефекты (окалина, вмятины, грубые риски и т. п.) должны быть удалены. Требования к качеству испытуемой поверхности зависят от при-

меняемого индентора и величины прилагаемой нагрузки. Чем меньше глубина вдавливания индентора, тем лучше должна быть подготовлена поверхность и тем более строго надо следить за тем, чтобы свойства поверхностного слоя не изменились вследствие наклёпа или разогрева при шлифовании и полировке.

Испытание на твёрдость – простой метод неразрушающего контроля. Экспериментально доказано, что его результаты коррелируют со статистическими характеристиками механических свойств, например, можно статистически достоверно, т.е. с определенной статистической погрешностью – стандартной ошибкой, определять временное сопротивление σ_v . Она также служит для косвенного суждения с определенной точностью о других характеристиках материала – пределе текучести, временном сопротивлении, склонности к ползучести и др.

Измерение твердости получило широкое распространение, как в заводской практике, так и при выполнении научных исследований. Такие испытания используются в следующих целях:

- для оценки твердости сплавов как характеристики, косвенно отражающей механические свойства;
- для контроля за качеством термических обработок, вызывающих изменение свойств в поверхностном слое, например, цементации, поверхностной закалки, электрохимической обработки и др.;
- для контроля за изменением механических свойств с течением времени эксплуатации (например, контроль за состоянием трубопроводов).

Испытания на твердость менее сложны и не дорогостоящи: они позволяют определять механические свойства и в небольших объемах, допускают текущий контроль изделий в процессе производства и эксплуатации, не влияя на их работоспособность и, что особенно ценно, относятся к неразрушающим методам механических испытаний.

2.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ

Схема измерения. Определение твёрдости по Бринеллю основано на статическом вдавливании стального закалённого шарика диаметром 2,5 мм, 5 мм или 10 мм в поверхность испытуемого изделия под нагрузкой от 187,5 кгс до 3000 кгс в течение 10...60 секунд. После снятия нагрузки измеряют диаметр отпечатка, оставшегося на

поверхности изделия (рис.5). В поверхностном слое под индентором идёт интенсивная пластическая деформация, а диаметр отпечатка получается тем меньше, чем выше сопротивление материала изделия деформации, производимой индентором.

Число твёрдости по Бринеллю HB есть отношение нагрузки F , действующей на шаровой индентор диаметром D , к площади S шаровой поверхности отпечатка:

$$HB = \frac{F}{S} \quad (5)$$

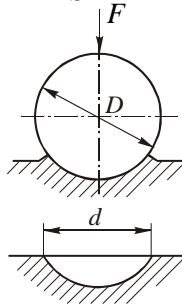


Рис. 5. Схема измерения твердости по Бринеллю, где F – приложенная нагрузка, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм

Число твёрдости имеет размерность напряжения $\text{кгс}/\text{мм}^2$, однако в соответствии со стандартом она не пишется.

$$1 \text{ кгс}/\text{мм}^2 = 10 \text{ МПа}$$

Нагрузка на шарик выбирается в зависимости от рода материала и должна быть пропорциональна квадрату диаметра шарика. Условные стандартные нормы, принятые для различных материалов, следующие:

- | | |
|-------------------------------------|----------------|
| – для стали и чугуна | $F = 30D^2$, |
| – для меди и медных сплавов | $F = 10D^2$, |
| – для баббитов и свинцовистых бронз | $F = 2,5D^2$. |

Более подробные сведения по выбору нагрузки, времени приложения нагрузки для различных материалов приводятся в соответствующей таблице в лаборатории испытания твердости.

Кроме того, нагрузка считается выбранной правильно, если выдерживается соотношение

$$0,2D < d < 0,6D. \quad (6)$$

Диаметр отпечатка измеряют с помощью лупы Бринелля или микроскопа в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют как среднее арифметическое из двух измерений. Лупа имеет шкалу, малое деление которой (или цена деления) равно 0,05 мм. На рис. 6 показано измерение диаметра отпечатка с помощью лупы. По результатам измерения диаметра отпечатка на данном материале твердость по Бринеллю определяется по формуле (5) или по табл. 1.

Как отмечалось ранее, между механическими свойствами (в частности, пределом прочности σ_B и твердостью по Бринеллю) существует определенная зависимость, которая может быть представлена эмпирической формулой:

$$\sigma_B = C \cdot HB \cdot 10 \text{ [МПа]},$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Для сталей	$C = 0,33 \dots 0,36$
Для алюминия	$C = 0,4$
Для меди	$C = 0,48$
Для дуралюмина	$C = 0,37$
Для латуни, бронзы	$C = 0,53$

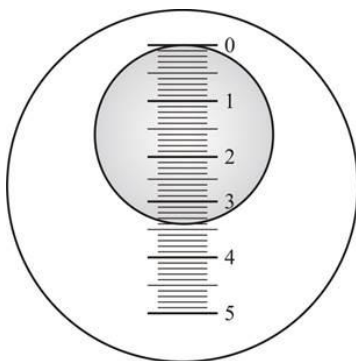


Рис.6. Изображение отпечатка, видимое в микроскоп

Следует отметить, что для хрупких материалов (чугун, алюмин) надежной корреляции между твердостью и пределом прочности получить не удастся. В частности, для определения предела прочности серого чугуна пользуются следующей эмпирической формулой:

$$\sigma_b = \frac{10 \cdot (HB - 40)}{6}, \text{ [МПа]} \quad (7)$$

При определении твердости *HB* шариком с $D = 10$ мм под нагрузкой $F = 3000$ кгс и времени выдержки $\tau = 10$ с число твердости записывается так: *HB 415*, *HB 321*, *HB 187* и т.д. При использовании других условий испытаний индекс *HB* дополняют числами, указывающими диаметр шарика мм, нагрузку кгс и время выдержки с. Например: *HB 5/750/30–350*.

Это число твердости по Бринеллю 350, полученное при вдавливании шарика диаметром 5 мм под нагрузкой 750 кгс в течение 30 с.

С помощью метода Бринелля можно испытывать материалы с твердостью от *HB 8* до *HB 450*. При большей твердости образца шарик - индентор остаточен деформируется на величину, превышающую стандартизованный допуск. Минимальная толщина испытуемого образца должна быть не менее 10-ти кратной глубины отпечатка. Поверхность образца должна быть отшлифована так, чтобы края отпечатка были достаточно отчетливы для измерения его диаметра с точностью 0,05 мм. Эти измерения проводят или на инструментальном микроскопе, или с помощью измерительной лупы.

2.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ

Схема измерения. Измерение твердости по Роквеллу производят вдавливанием в испытуемый образец (или деталь) алмазного конуса с углом 120° при вершине или стального шарика диаметром 1,5875 мм.

Вдавливание индентора осуществляется действием двух по-

следовательно прилагаемых нагрузок: предварительной F_0 и общей F .

$$F = F_0 + F_1 \quad (8)$$

где $F_0 = 10$ кгс, F_1 - основная нагрузка, равная 50, 90 или 140 кгс.

Число твёрдости по Роквеллу измеряют в условных единицах, и оно является мерой глубины вдавливания индентора под определённой нагрузкой. Схема определения твёрдости приведена на рис. 7.

Сначала индентор вдавливается в поверхность образца под предварительной нагрузкой $F_0 = 10$ кгс, которая не снимается до конца испытания. Это обеспечивает повышенную точность испытания, т.к. исключает влияние тонкого поверхностного слоя. Под нагрузкой F_0 индентор вдавливается в образец на глубину h_0 . Затем на индентор подаётся общая нагрузка $F = F_0 + F_1$, и глубина вдавливания увеличивается. Глубина вдавливания h после снятия основной нагрузки F_1 , когда на индентор действует только предварительная нагрузка F_0 , и определяет число твёрдости по Роквеллу HR .

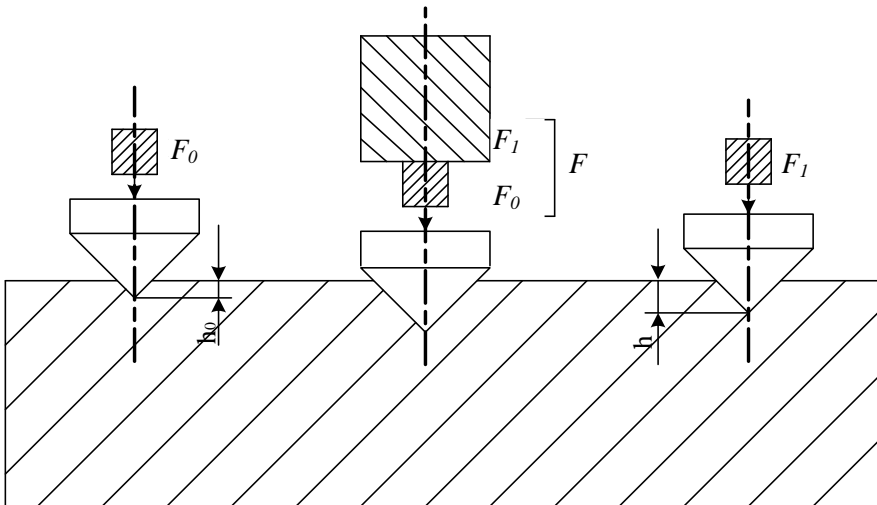


Рис.7. Схема измерения твердости по Роквеллу

Таблица 1

Соотношение чисел твердости, определенных различными методами

Диаметр отпечатка d в мм	При испытании вдавливанием				
	Стального шарика 10/3000 (на приборе типа Бри- нелля) <i>HB</i>	Алмазного конуса или стального шарика (на приборе типа Роквел- ла), при различных нагрузках			Алмазной пирамиды (на прибо- ре типа Виккерса) <i>HV</i>
		150 кГ (конус) <i>HRC</i>	60 кГ (конус) <i>HRA</i>	100 кГ (шарик) <i>HRB</i>	
2,20	780	72	84	-	1124
2,25	745	70	83	-	1116
2,30	712	68	82	-	1022
2,35	682	66	81	-	941
2,40	653	64	80	-	868
2,45	627	62	79	-	804
2,50	601	60	78	-	746
2,55	578	58	78	-	694
2,60	555	56	77	-	650
2,65	534	54	76	-	606
2,70	514	52	75	-	587
2,75	495	50	74	-	551
2,80	477	49	74	-	534
2,85	461	48	73	-	502
2,90	444	46	73	-	474
2,95	429	45	72	-	460
3,00	415	43	72	-	435
3,05	401	42	71	-	423
3,10	388	41	71	-	401
3,15	375	40	70	-	390
3,20	363	39	70	-	380
3,25	352	38	69	-	361
3,30	341	36	68	-	344
3,35	331	35	67	-	334
3,40	321	33	67	-	320
3,45	311	32	66	-	311
3,50	302	31	66	-	303
3,55	293	30	65	-	392
3,60	285	29	65	-	285
3,65	277	28	64	-	278
3,70	269	27	64	-	270

3,75	262	26	63	-	261
3,80	255	25	63	-	255
3,85	248	24	62	-	249
3,90	241	23	62	102	240
3,95	235	21	61	101	235
4,00	229	20	61	100	228
4,05	223	19	60	99	222
4,10	217	17	60	98	217
4,15	212	15	59	97	213
4,20	207	14	59	95	208
4,25	201	13	58	94	201
4,30	197	12	58	93	197
4,35	192	11	57	92	192
4,40	187	9	57	91	186
4,45	183	8	56	90	183
4,50	179	7	56	90	178
4,55	174	6	55	89	174
4,60	170	4	55	88	171
4,65	167	3	54	87	166
4,70	163	2	53	86	162
4,75	159	1	53	85	159
4,80	156	0	52	84	155
4,85	152	-	-	83	152
4,90	149	-	-	82	149
4,95	146	-	-	81	148
5,00	143	-	-	80	143
5,05	140	-	-	79	140
5,10	137	-	-	78	138
5,15	134	-	-	77	134
5,20	131	-	-	76	131
5,25	128	-	-	75	129
5,30	126	-	-	74	127
5,35	123	-	-	73	123
5,40	121	-	-	72	121
5,45	118	-	-	71	118
5,50	116	-	-	70	116
5,55	114	-	-	68	115
5,60	111	-	-	67	113
5,65	109	-	-	66	110
5,70	107	-	-	65	109
5,75	105	-	-	64	108

Чем больше глубина вдавливания h , тем меньше число твёрдости HR . За единицу твёрдости принимают величину, равную осевому перемещению индентора на 0,002 мм

При вдавливании алмазного конуса твёрдость определяют по двум шкалам А и С. При измерении по шкале А: $F_0 = 10$ кгс, $F_1 = 50$ кгс, $F = 60$ кгс. При измерении по шкале С. $F_0 = 10$ кгс, $F_1 = 140$ кгс и $F = 150$ кгс (табл.2).

При вдавливании стального шарика число твёрдости определяют по шкале В при $F_0 = 10$ кгс, $F_1 = 90$ кгс и $F = 100$ кгс

Число твёрдости по Роквеллу записывается так:

HRA 80, или HRC 45, или HRB 76 и т.д.

«Единица измерения Роквелла» (в отличие от единиц Бригелля и Виккерса) величина *безразмерная*.

Таблица 2

Условия испытания на твёрдость по Роквеллу в зависимости от характеристик материала

Характеристика испытываемого материала	Шкала	Тип индентора	Нагрузка Р, кгс	Обозначение твёрдости	Пределы измерения
Отожжённые стали, серый чугун, цветные металлы и их сплавы	<i>B</i>	Стальной шарик	100	<i>HRB</i>	25...100
Закалённые или закаленные и отпущенные стали	<i>C</i>	Алмазный конус	150	<i>HRC</i>	20...67
Твердые сплавы	<i>A</i>	Алмазный конус	60	<i>HRA</i>	70...85

Определение твердости по Роквеллу используется очень широко, так как этот метод позволяет измерять твёрдость различных материалов как твёрдых, так и мягких. Отпечатки от индентора на испытуемой поверхности очень малы, поэтому можно испытывать готовые детали без их порчи. Испытание легко выполнимо, не требует никаких вычислений и занимает всего несколько секунд. Число твёрдости по Роквеллу читается прямо на соответствующей шкале индикатора (рис. 8.) и может быть легко переведено в число твёрдости по Бринеллю с помощью табл. 1.



Рис.8. Циферблат прибора для проверки твёрдости по Роквеллу

2.2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ

Этот метод основан на статическом вдавливании алмазного индентора в форме четырёхгранной пирамиды с углом при вершине 136° (рис. 9). После удаления нагрузки F , действовавшей определённое время (от 10 до 30 секунд), с помощью микроскопа измеряют диагональ отпечатка d , оставшегося на поверхности образца. Число твёрдости HV (записывается без размерности, например, HV 423) определяют делением нагрузки на площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка:

$$HV = \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2} \left[\frac{\kappa\Gamma}{\text{мм}^2} \right] \quad (9)$$

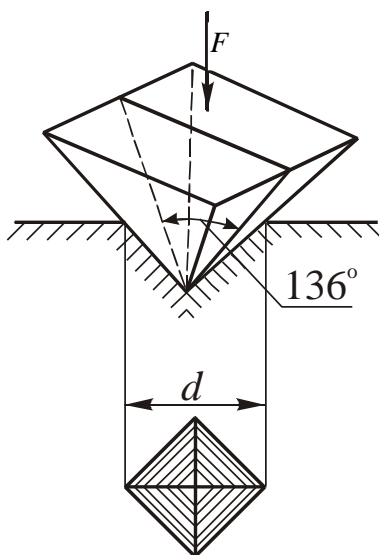


Рис. 9. Схема измерения твердости по Виккерсу

Таким образом, в результате испытания определяют только размер диагонали d восстановленного отпечатка. Зная использованную нагрузку F , можно найти число твёрдости HV или расчётным путём по формуле (9), или по специальным таблицам, составленным с использованием этой формулы (табл.1).

Относительно небольшие нагрузки (от 5 до 100 кгс) и малая глубина вдавливания индентора позволяют измерять твёрдость тонкостенных деталей и даже тонких поверхностных слоев. Однако испытываемая поверхность требует тщательной обработки, чаще всего полировки.

Физический смысл числа твёрдости по Виккерсу аналогичен числу твёрдости по Бринеллю. Величина HV характеризует обычно сопротивление материала значительной пластической деформации. Числа HV и HB близки по абсолютной величине при твёрдости не выше HV 450. Выше этих значений метод Бринелля даёт искажённые результаты из-за остаточной деформации стального шарика; Алмазная же пирамида в методе Виккерса позволяет определять твёрдость практически любых металлических материалов.

3. ЗАДАЧИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задачи: изучить методику определения твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу и дать заключение об эффективности использования каждого метода.

После выполнения лабораторной работы студенты должны приобрести навыки:

- измерения твердости металлов и сплавов;
- работы с твердомерами различных систем.

Порядок выполнения работы

I. Заполните табл. 5, кратко описав каждый из методов определения твердости.

II. Определите твердость методом Бринеля:

Наиболее распространённым прибором для испытания на твёрдость по Бринеллю является автоматический рычажный пресс. Прежде, чем приступить к испытаниям, надо подобрать диаметр шарика-индентора и установить необходимую нагрузку. Выбор диаметра шарика и величины нагрузки производится в зависимости от твёрдости и толщины испытуемого материала. При определении твёрдости чёрных металлов (стали и чугуна) чаще всего используют шарик диаметром 10 мм и нагрузку 3000 кгс. С уменьшением толщины материала и его твёрдости применяют шарики меньшего диаметра и меньшую нагрузку.

1. Отшлифуйте образец, обеспечив параллельность его опорной и испытуемой поверхностей, и установите его на предметный столик твердомера, так чтобы центр отпечатка находился на расстоянии не менее $2,5d$ от края образца.
2. Вращением маховика по часовой стрелке подведите столик с образцом к шарика. Далее продолжайте вращать маховик до упора.
3. Нажатием кнопки на боковой стенке прибора включите электродвигатель и, дождавшись его автоматического отключения, отведите столик с образцом вниз путём вращения маховика против часовой стрелки.

4. Снимите образец со столика и измерьте диаметр полученного отпечатка с точностью до 0,05 мм, пользуясь для этого микроскопом МПБ-2 с 24-кратным увеличением,
5. С помощью специальной таблицы (табл.1) определите число твёрдости испытываемого образца.
6. Для получения достоверного результата рекомендуется делать на каждом образце не менее трёх отпечатков на расстоянии не менее $4d$ друг от друга.
7. Полученные значения d и HB занесите в табл. 3 по прилагаемой форме и определите среднее значение твёрдости для данного образца.

Таблица 3
Результаты измерения твёрдости по методу Бринелля

№ образца	Материал образца условия испытания (диаметр шарика D мм, нагрузка P кгс, время выдержки τ с)	Диаметры отпечатков, мм			Числа твёрдости по соответствующим отпечаткам, HB			Среднее значение твёрдости, HB
		I	II	III	I	II	III	

III. Определите твердость методом Роквелла:

Поверхности образца, как испытываемая, так и опорная, должны быть параллельны и не иметь таких дефектов, как окалина, забоины, грязь и т.п. Все дефекты должны быть удалены мелкозернистым наждачным кругом или напильником. В процессе обработки поверхность не должна нагреваться выше $100...150^{\circ}C$, так как это может привести к изменению её твёрдости.

Величину нагрузки и тип индентора (алмазный конус или стальной шарик) выбирают в зависимости от предполагаемой твёрдости испытываемого материала, пользуясь табл.2.

Выберите необходимый индентор, нагрузку и установите их на твердомер, затем приступите к проведению испытаний.

Измерение твёрдости по Роквеллу рекомендуется проводить в

следующем порядке:

1. Включением тумблера подайте напряжение на электродвигатель.
2. Подготовленный образец установите на предметный стол твердомера.
3. Вращением маховика по часовой стрелке плавно поднимите стол с образцом до тех пор, пока индентор окажется вдавленным в образец с предварительной нагрузкой $F_0 = 10$ кгс. Этот момент будет достигнут, когда маленькая стрелка на вспомогательном лимбе индикатора совпадет с красной точкой на шкале (рис.8).
4. Вращением барабана, расположенного под маховиком, установите нулевую отметку чёрной шкалы (шкалы C) против конца большой стрелки.
5. Плавным нажатием руки на клавишу включите привод механизма нагружения. При этом на индентор подаётся общая нагрузка, и большая стрелка индикатора вращается против часовой стрелки. После окончания вдавливания основная нагрузка автоматически снимается, и на индентор действует только предварительная. При этом большая стрелка индикатора перемещается по часовой стрелке и в момент остановки указывает на соответствующей шкале число твёрдости по Роквеллу. При испытании алмазным конусом под нагрузкой 60 или 150 кгс отсчёт производят по чёрной шкале, а при испытании стальным шариком под нагрузкой 100 кгс - по красной шкале.
6. Запишите полученное значение твёрдости в таблицу (см.табл.4), повторите испытание в другом месте образца. Предварительно вращением маховика против часовой стрелки опустите стол твердомера вместе с образцом и тем самым снимите предварительную нагрузку.
7. На каждом образце рекомендуется делать не менее трёх замеров в разных точках и подсчитайте среднее значение твёрдости.
8. Полученное среднее значение твёрдости по Роквеллу переведите в число твёрдости по Бринеллю, пользуя таблицу перевода (табл.1).

Таблица 4
 Результаты измерения твёрдости по методу Роквелла

№ образца	Материал (сталь отожжённая, сталь закалённая, чугун и т.п.)	Шкала Роквелла	Тип индентора	Общая нагрузка Р, кгс	Число твёрдости <i>HR</i>				Число твёрдости по Бринеллю, полученное путём перевода (НВ)
					Номера за- меров			Среднее	
					I	II	III		

4.ПРАВИЛА ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ

1. Запрещается приступать к работе до получения инструктажа по технике безопасности и росписи в журнале.

2. Необходимо помнить, что напряжение в сети 220...380 В. Поэтому не следует касаться металлических частей оборудования, не убедившись перед началом работы в надежности заземления прибора.

3. При создании предварительной нагрузки в 9,87 Н (10 кгс) на приборе Роквелла запрещается переводить малую стрелку индикатора за черный штрих, что влечет за собой выход из строя прибора.

Таблица 5

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА ТВЕРДОСТЬ

	Характеристика испытываемого материала, область применения	Тип индентора, шкала	Нагрузки	Обозначение твердости	Единицы измерения	Достоинства	Недостатки
Бринелль							
Роквелл							
Виккерс							

5. СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Необходимые материалы и оборудование

1. Маркированные образцы сталей с твердостью не выше 450
НВ.
2. Твердомер Бринелля.
 3. Твердомер Роквелла.
 4. Микроскоп МПБ-2.
 5. Таблица для определения и перевода твёрдости.

Устройство и принцип работы твердомера Бринелля

На рис. 10 приведена принципиальная схема твердомера ТБ 5004.

Основными частями прибора являются:

1. Шпиндель 6, в который вставляются сменные инденторы с шариками разного диаметра.
2. Подвеска 18 с набором грузов.
3. Маховик 1, перемещающий опорный столик 5 с образцом в вертикальном направлении.
4. Система рычагов 12, 15, 17-19, передающих нагрузку на испытуемый образец.
5. Электродвигатель 21, обеспечивающий работу прибора.
6. Пульт управления с переключателями режима работы, сигнальными лампами “контроль”, “выдержка”, “сеть”, реле времени.
7. Кнопки “пуск” и “стоп”.

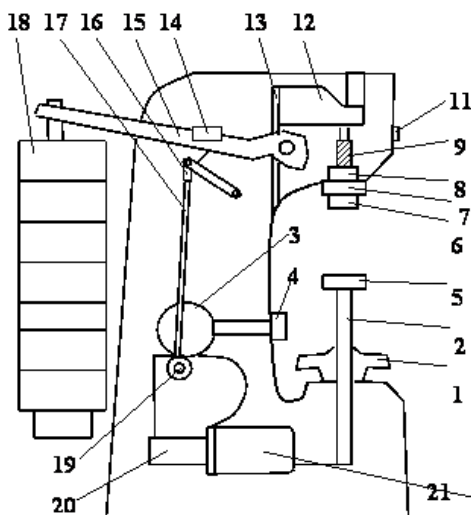


Рис.10. Схема прибора для определения твердости по Бринеллю

Устройство твердомера Роквелла

На рис.11. приведена принципиальная схема твердомера Роквелла. Основными его частями являются: поперечина 1, подвеска 2, шток амортизатора 3, рычаг 4, рукоятка 5, винт 6, крышка 7, рычажок 8, призма 9, шпindel 10 с закрепленным на его конце индентором, маховик 11 для перемещения образца, шпонка 12, направляющая втулка 13, станина 14, грузы 15, стойка 16, подъемный винт 17, масляный амортизатор 18, пружина 19, индикатор с двумя шкалами – черной (С) и красной (В). При этом с большой стрелкой индикатора всегда совмещается нуль черной шкалы, и ни в коем случае – красной. Барабан для точной установки шкалы индикатора на нуль, электромотор, обеспечивающий работу прибора.

Перевод значений твердости HR в HB провести по табл. 3.

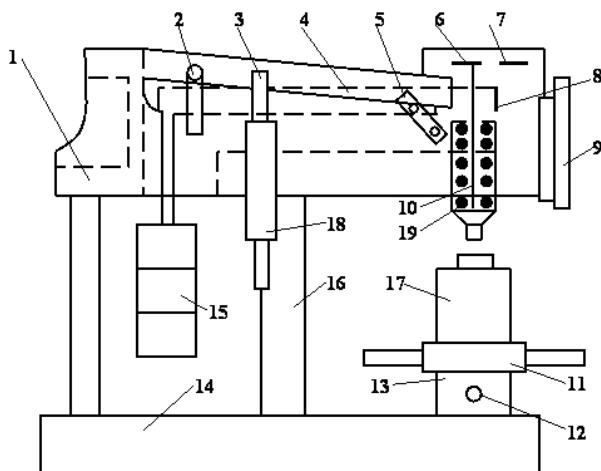


Рис.11. Прибор для измерения твердости по Роквеллу

6. ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующий материал:

1. Название и цель работы.
2. Задачи и порядок выполнения работы.
3. Краткое описание методов определения твердости и область их применения (табл.5).
4. Значение данного метода испытания для определения свойств металлов и сплавов.
5. Твёрдость образца, определенная методами Бринелля и Роквелла. Для получения достоверных средних значений произвести замер твёрдости не менее 3 раз каждым из методов. Результаты определения твёрдости оформите в виде табл.3-4 по прилагаемым образцам.
6. Результаты и выводы лабораторной работы.
7. Список используемой литературы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение и характеристики основных механических свойств:

- а) прочности;
- б) пластичности;
- в) вязкости;
- г) упругости;
- д) твердости;
- е) хрупкости.

2. Нарисуйте диаграмму растяжения поликристаллического образца и покажите возможность определения по ней характеристик основных механических свойств,

3. Объясните, что обозначают символы $\sigma_{0,2}$, σ_g . Назовите единицы измерения.

4. Дайте характеристики пластичности: δ , ψ .

5. Объясните, что означает KCV , KCU , KCT . Назовите единицы измерения.

6. Объясните, что такое хладноломкость и чем она характеризуется. Объясните как она используется конструктором.

7. Объясните в чем причины широкого применения твердости, как характеристики механического свойства.

8. Перечислите способы определения твердости материала.

9. Объясните, имеется ли связь между числами твердости, найденными различными методами.

10. Определите, имеется ли связь между твердостью материала и его механическими характеристиками. Укажите эти зависимости.

11. Расскажите последовательность операций и основные требования ГОСТ при определении твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.

12. Назовите единицы измерения твердости по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу.

13. Перечислите достоинства и недостатки методов определения твердости.

14. Назовите формы, размеры и материал индентора (наконечника) при определении твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богодухов, С.И. Курс материаловедения в вопросах и ответах [Электронный ресурс]: С.И. Богодухов, А.В. Синюхин, Е.С. Козик. — 4-е изд.— М. : Машиностроение, 2014. — 352 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/63212>.

(УМО высшего образования)

2. Сапунов, С.В. Материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие / С.В. Сапунов — 2-е изд., испр. и доп. — СПб. : Лань, 2015. — 208 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/56171>.

(УМО по образованию в области производственного менеджмента)

3. Солнцев Ю.П. Специальные материалы в машиностроении [Электронный ресурс]: учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирайнен – 2-е изд., стереотип.— СПб.: ХИМИЗДАТ, 2014.— 639 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22544.html>.— ЭБС «IPRbooks».

4. Буслаева Е.М. Материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие / Буслаева Е.М.— Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2012.— 148 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/735.html>.— ЭБС «IPRbooks».

