

**Тема:** Механические свойства

**Вопросы:**

1. Механические свойства металлов и сплавов
2. Методы определения механических свойств металлов и сплавов
3. Методы определения твёрдости материалов

### 1. Механические свойства металлов и сплавов

**Механическими свойствами** называется совокупность свойств, характеризующих способность металлических материалов сопротивляться воздействию внешних усилий (нагрузок). К механическим свойствам можно отнести: прочность, *твёрдость*, *пластичность*, *упругость*, *вязкость*, *хрупкость*, *усталость*, *ползучесть* и *износостойкость*.

Механические свойства металлов являются основной характеристикой, поэтому на заводах созданы специальные лаборатории, где производятся различные испытания с целью определения этих свойств.

Механические испытания делят на:

- **статические**, при которых нагрузка, действующая на образец, остаётся постоянной или возрастает крайне медленно;
- **динамические (ударные)** – нагрузка, характеризующаяся быстрым изменением во времени её значения, направления или точки приложения и вызывающая в элементах конструкции значительные силы инерции. Динамические нагрузки испытывают детали машин ударного действия, таких, как прессы, молоты и т. д.;
- **испытания при повторных или знакопеременных нагрузках** – процесс постепенного накопления повреждений металла под действием повторно-переменных нагрузок вызывает соответствующие знакопеременные напряжения и приводит к образованию трещин и разрушению.

**Твёрдость** – это сопротивление материала проникновению в его поверхность стандартного тела (индентора), не деформирующегося при испытании.

**Прочность** - это способность металла или сплава противостоять деформации и разрушению под действием приложенных нагрузок - растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих и срезающих

Нагрузки бывают **внешними** (вес, давление и др.) и **внутренними** (изменение размеров тела от нагревания и охлаждения, изменение структуры металла и т. д.), а также **статическими**, т. е. постоянными по величине и направлению действия, или **динамическими**, т. е. переменными по величине, направлению и продолжительности действия.

**Упругостью** называется способность металла или сплава восстанавливать первоначальную форму после прекращения действия внешней нагрузки.

**Пластичностью** называется способность металла или сплава, не разрушаясь, изменять форму под действием нагрузки и сохранять эту форму после ее снятия.

**Ударной вязкостью** называется способность металла или сплава сопротивляться действию ударных нагрузок.

**Ползучестью** называется свойство металла или сплава медленно и непрерывно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки (особенно при повышенных температурах).

*Усталостью* называется постепенное разрушение металла или сплава при большом числе повторно-переменных нагрузок; свойство выдерживать эти нагрузки называется *выносливостью*.

## **2. Методы определения механических свойств металлов и сплавов**

Во многих случаях металлические материалы в конструкциях работают под статическими нагрузками. Поэтому для оценки механических свойств широко используются статические испытания, которые проводятся с применением разных схем напряжённого состояния в образце. К основным разновидностям статических испытаний относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

### **1. Испытания на растяжение**

Испытания на одноосное растяжение – наиболее распространённый вид испытаний для оценки механических свойств металлов и сплавов – сравнительно легко подвергаются анализу, позволяют по результатам одного опыта определять сразу несколько важных механических характеристик материала, являющихся критерием его качества и необходимых для конструкторских расчётов.

Методы испытания на растяжение стандартизированы. Имеются отдельные стандарты на испытания при комнатной температуре, при повышенных температурах до 1473К и пониженных температурах от 273К до 173К. В них сформулированы определения характеристик, оцениваемых при испытании, даны типовые формы и размеры образцов, основные требования к испытательному оборудованию, методика проведения испытания и подсчёта результатов.

### **Образцы для испытаний на растяжение**

Для испытаний на растяжение используют образцы с рабочей частью в виде цилиндра (цилиндрические образцы) или стержня с прямоугольным сечением (плоские образцы). На рис. 1 показаны наиболее часто используемые стандартные образцы для испытаний при комнатной температуре (а, б), повышенных (в, г) и отрицательных (г) температурах.

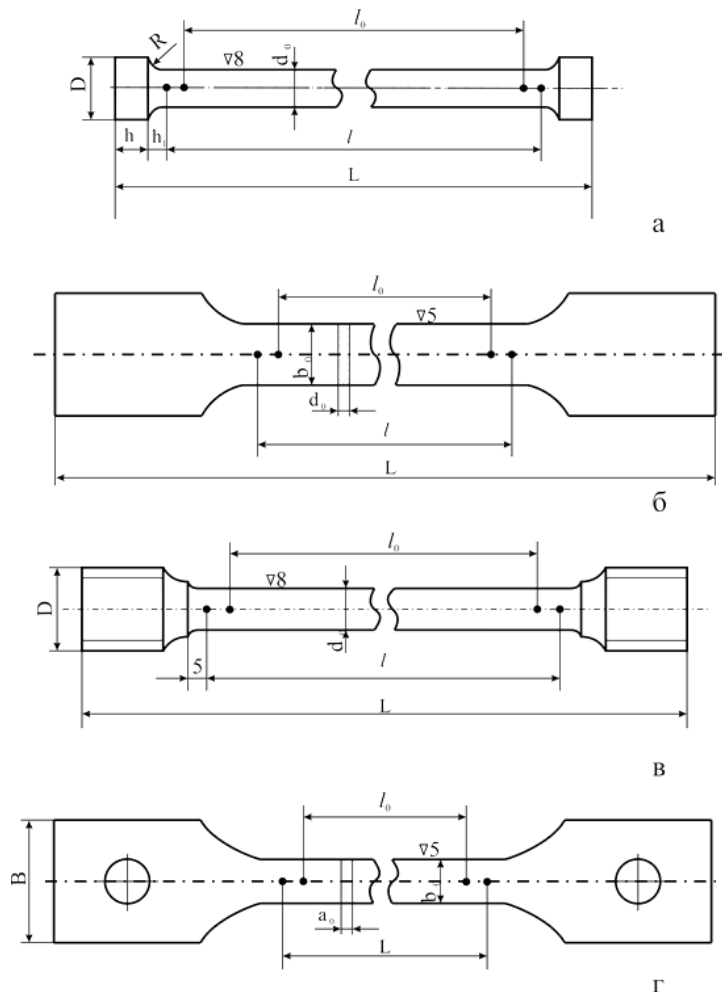


Рис. 1 - Стандартные образцы для испытаний на растяжение  
Основные размеры образца:

- рабочая длина  $l$  – часть образца между его головками или участками для захвата с постоянной площадью поперечного сечения;
- начальная расчётная длина  $l_0$  – участок рабочей длины, на котором определяется удлинение;
- начальный диаметр рабочей части  $d_0$  для цилиндрических или начальная толщина  $a_0$  и ширина  $b_0$  рабочей части для плоских образцов.

### ***Машины для испытаний на растяжение***

Машины для испытаний на растяжение очень разнообразны. Многие из них универсальны и могут быть использованы при проведении других статических испытаний (рис. 2). Современные машины высшего класса представляют собой сложные, частично или полностью автоматизированные устройства; при их помощи может проводиться расчёт любых характеристик свойств в процессе испытания или сразу после его окончания.

Силовая рама универсальной испытательной машины включает в себя следующие элементы:

- основание 1, представляющее собой силовую металлическую плиту, на которой монтируется вся конструкция силовой рамы;
- колонны 2, которые представляют собой гладкие, хромированные, шлифованные и обработанные с высокой точностью металлические цилиндрические направляющие, по которым перемещается подвижная траверса 3 в установочном режиме при изменении рабочего пространства, и на которых подвижная траверса 3 фиксируется во время проведения испытаний;

- подвижную траверсу 3, представляющую собой несущую конструкцию, на которой закреплен силовой гидроцилиндр 4 двунаправленного действия;
- силовой гидроцилиндр 4, имеющий типовую конструкцию с двумя симметричными полостями и двумя концами штоков, выходящими за габариты гидроцилиндра;
- сквозные отверстия, через которые проходят колонны, разрезаны, перпендикулярно плоскости разреза установлены гидрозажимы 5, осуществляющие фиксацию подвижной траверсы 3 на колоннах 2;
- гидрозажимы 5, как упоминалось ранее, предназначенные для фиксации подвижной траверсы 3 на колоннах 2;
- гидроцилиндры спуска-подъема 6, необходимые для перемещения подвижной траверсы 3 в установочном режиме для изменения габаритов рабочего пространства, имеющие одну рабочую полость, в которую нагнетается рабочая жидкость при подъеме подвижной траверсы 3 и стравливается при ее опускании;
- датчики силы 7, предназначенные для измерения усилия на испытуемом объекте. Конструкция датчика не имеет принципиального значения и может быть тензометрического, струнного или магнитострикционного типа;
- приспособления 8, предназначенные для фиксации образцов при проведении испытаний на растяжение и сжатие. Приспособления на чертеже показаны схематично;
- дополнительная траверса 9 аналогична основанию 1, но не имеет мест крепления гидроцилиндров спуска - подъема 6.

В нижней зоне испытаний к нижнему штоку силового гидроцилиндра двунаправленного действия 4 и через датчик силы 7 к основанию 1 присоединены захватные приспособления 8 для проведения испытаний на растяжение. В верхней зоне испытаний к верхнему штоку силового гидроцилиндра двунаправленного действия 4 и через датчик силы 7 к дополнительной траверсе 9 присоединены приспособления для испытаний на сжатие. Поскольку условия для проведения испытаний в двух зонах одинаковы, приспособления могут располагаться в них произвольно.

***Устройство работает следующим образом:***

Перед проведением испытания, в установочном режиме, в рабочие полости гидроцилиндров спуска-подъема 6 нагнетается (или стравливается) рабочая жидкость, вызывающая перемещение подвижной траверсы 3 с целью установки испытуемого образца в захватные приспособления 8.

После установки испытуемого образца гидрозажимы 5 фиксируют подвижную траверсу 3 в исходном для проведения испытания состоянии.

В соответствии с заданным законом управления в полости силового гидроцилиндра двунаправленного действия 4 под давлением подается рабочая жидкость, вызывающая перемещение плунжера силового гидроцилиндра 4 в том или ином направлении. Установленный в захватных приспособлениях 8 испытуемый образец деформируется, при этом деформируется и соответствующий датчик силы 7, расположенный последовательно с испытуемым образцом. Электрический сигнал, пропорциональный полученной датчиком силы 7 деформации, поступает на измерительные устройства.

Предлагаемая силовая рама универсальной испытательной машины, имеющая двухзонную конструкцию, имеет повышенную жесткость по сравнению с

предшествующими аналогом и прототипом, за счет фиксации подвижной траверсы 3 гидрозажимами 5 на колоннах 2.

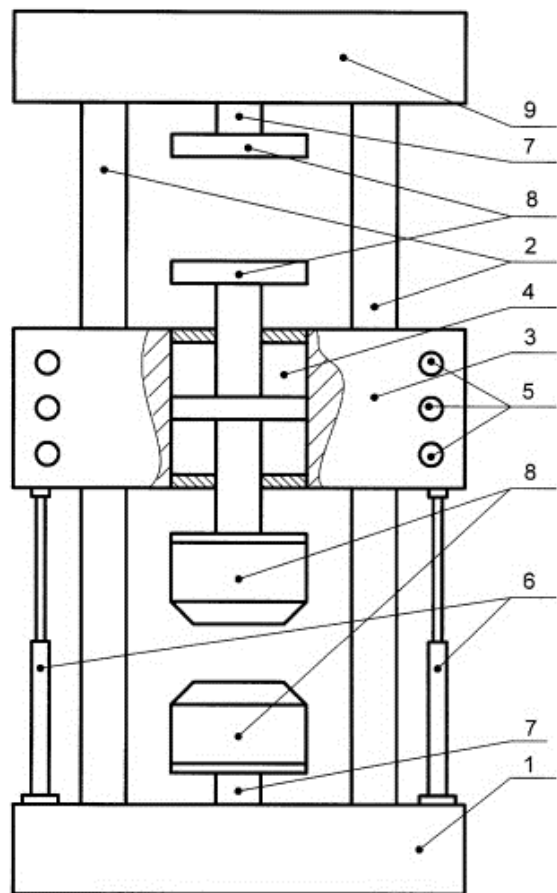


Рис. 2 - Схема универсальной испытательной машины

В обеих зонах испытания силовые напряжения замыкаются внутри жестко связанных элементов силовой рамы:

- в верхней зоне - между колоннами 2, дополнительной траверсой 9 и подвижной траверсой 3, зафиксированной гидрозажимами 5;
- в нижней зоне - между колоннами 2, подвижной траверсой 3, зафиксированной гидрозажимами 5, и основанием 1.

Вторым бесспорным достоинством силовой рамы является симметричная структура ее верхней и нижней испытательных зон. Двухнаправленный гидроцилиндр 4 позволяет создавать растягивающие и сжимающие нагрузки в обеих испытательных зонах.

В предшествующих аналоге и прототипе нижняя испытательная зона предназначена для испытаний только на растяжение, верхняя - только для сжатия.

Симметричность зон испытания создает условия, удобные при эксплуатации за счет того, что в нижней зоне теперь можно проводить испытания и на растяжение, и на сжатие, и руководствоваться выбором зоны испытания, например, объемом проводимых испытаний или габаритами испытуемых изделий.

Основными узлами любой испытательной машины являются приводное устройство, обеспечивающее плавное деформирование образца, и силоизмерительный механизм для измерения силы сопротивления образца создаваемой деформации.

#### ***Методика проведения испытаний на растяжение***

Основные требования к методике проведения испытаний на растяжение оговорены в стандартах. Эти требования следует рассматривать как минимальные. При выполнении, например, исследовательских работ они могут быть значительно

повышены. Соблюдение стандартной методики испытания особенно важно на заводах в тех случаях, результаты являются критерием качества продукции или её паспортными характеристиками.

Каждый образец перед испытанием маркируют, измеряют и размечают. Диаметр измеряется в трех сечениях расчетной части: у головок и в среднем сечении. Наименьший диаметр используется в дальнейших расчетах. Диаметр цилиндрических образцов следует измерять с точностью не ниже 0,01 мм при  $d_0 \leq 10$  мм, 0,05 мм при  $d_0 \geq 10$  мм, 0,1 мм при  $d_0 \geq 100$  мм, 0,5 мм при  $d_0 \geq 200$  мм и до 1,0 мм при  $d_0 \geq 200$  мм. С такой же точностью необходимо измерять толщину плоских образцов, соответственно при  $a_0 \geq 2$  мм и  $a_0 \leq 2$  мм. Величину начальной длины  $l_0$  принимают равной  $5d_0$  или  $10d_0$  и округляют в большую сторону: для образцов с  $l_0 = 5,65$  – до ближайшего числа, кратного 5; для образцов с  $l_0 = 11,3$  – до ближайшего числа, кратного 10.

Все размеры после испытания определяют с точностью не ниже 0,1 мм. Для получения более точных результатов пользуются инструментальными микроскопами. Каждый размер следует измерять несколько раз. Начальную расчетную длину  $l_0$  с погрешностью 1 % ограничивают на рабочей длине образца кернами, рисками или иными метками.

### **Общие закономерности сопротивления материалов растяжению**

Основным результатом испытания на растяжение является первичная диаграмма растяжения в координатах “нагрузка ( $P$ ) – абсолютное удлинение ( $l$ )”, которая автоматически записывается на диаграммной ленте испытательной машины. При автоматизированной обработке данных параметры  $P$  и  $l$  вводятся в память вычислительного устройства.

Для различных металлов и сплавов все многообразие первичных диаграмм растяжения можно свести в первом приближении к трем типам (рис. 3).

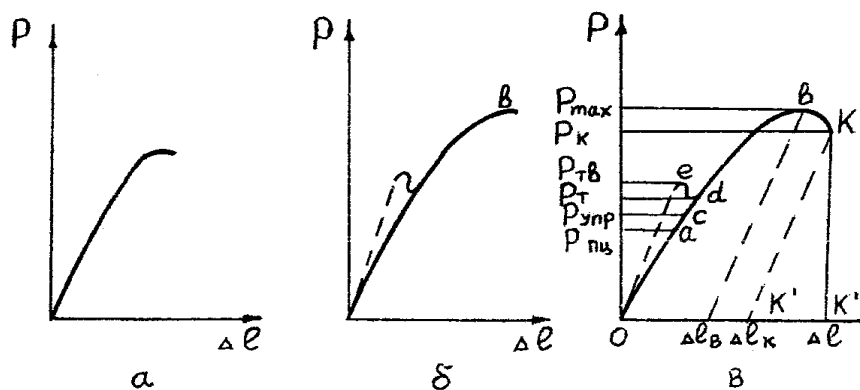


Рис. 3 - Разновидности первичных диаграмм растяжения

Диаграмма растяжения первого типа (рис. 3, а) характерна для образцов, разрушающихся хрупко, без заметной пластической деформации. Диаграммы второго типа (рис. 3, б) получаются при растяжении образцов, равномерно деформирующихся вплоть до разрушения. Диаграмма третьего типа (рис. 4, в) характерна для образцов, разрушающихся после образования местного утонения (шейки) в результате локализации области интенсивной пластической деформации. Возрастание нагрузки до момента разрушения может быть либо монотонным (рис.3, сплошные линии), либо со спадами и горизонтальным участком (рис.3, в, пунктирные линии).

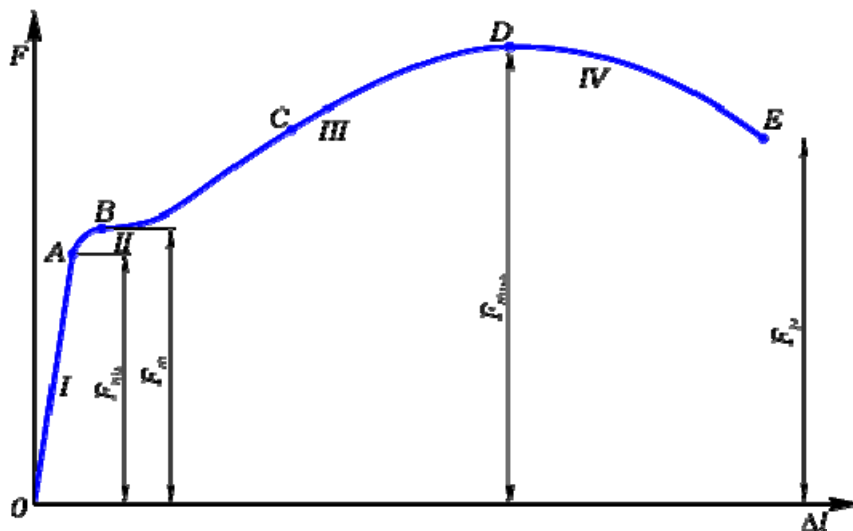


Рис. 4 - Диаграмма растяжения для малоуглеродистой стали

На рис. 4 показана диаграмма для малоуглеродистой стали. Она построена в системе координат  $F-\Delta l$ ,

где  $F$  - продольная растягивающая сила, [Н];

$\Delta l$  - абсолютное удлинение рабочей части образца, [мм].

*Как видно из рисунка, диаграмма имеет четыре характерных участка:*

*I - участок пропорциональности;*

*II - участок текучести;*

*III - участок самоупрочнения;*

*IV - участок разрушения.*

*Рассмотрим подробнее процесс построения диаграммы.*

В самом начале испытания на растяжение, растягивающая сила  $F$ , а, следовательно, и деформация  $\Delta l$  стержня равны нулю, поэтому диаграмма начинается из точки пересечения соответствующих осей (точка  $O$ ).

На участке I до точки A диаграмма вычерчивается в виде прямой линии. Это говорит о том, что на данном отрезке диаграммы, деформации стержня  $\Delta l$  растут пропорционально увеличивающейся нагрузке  $F$ .

После прохождения точки A диаграмма резко меняет свое направление и на участке II начинающемся в точке B линия какое-то время идет практически параллельно оси  $\Delta l$ , то есть деформации стержня увеличиваются при практически одном и том же значении нагрузки.

В этот момент в металле образца начинают происходить необратимые изменения. Перестраивается кристаллическая решетка металла. При этом наблюдается эффект его самоупрочнения.

После повышения прочности материала образца, диаграмма снова "идет вверх" (участок III) и в точке D растягивающее усилие достигает максимального значения. В этот момент в рабочей части испытуемого образца появляется локальное утоньшение (рис. 2), так называемая "шейка", вызванное нарушениями структуры материала (образованием пустот, микротрещин и т.д.).

Вследствие утоньшения, и следовательно, уменьшения площади поперечного сечения образца, растягивающее усилие необходимое для его растяжения уменьшается, и кривая диаграммы "идет вниз".

В точке E происходит разрыв образца. Разрывается образец конечно же в сечении, где была образована "шейка"

***Прочностные характеристики при растяжении***

Механические свойства при растяжении, как и при других статических испытаниях, могут быть разделены на три основные группы: прочностные, пластические и характеристики вязкости. Прочностные свойства – это характеристики сопротивления материала образца деформации или разрушению. Большинство стандартных прочностных характеристик рассчитывают по положению определённых точек на диаграмме растяжения, в виде условных растягивающих напряжений.

**Предел пропорциональности,  $\sigma_{пц}$**  – максимальное напряжение до которого наблюдается прямая пропорциональность между растягивающей нагрузкой  $P$  и абсолютным удлинением  $\ell$  (или между нормальным напряжением и относительной деформацией на условной диаграмме растяжения).

**Предел текучести (физический),  $\sigma_{т}$**  – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки (соответствует нагрузке  $P_t$ , на рис. 2 в, пунктир).

**Предел текучести условный,  $\sigma_{0,2}$**  – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % длины участка образца, удлинение которого принимается в расчет при определении указанной характеристики.

**Временное сопротивление,  $\sigma_{вс}$**  – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $P_{max}$  предшествующей разрушению образца.

**Истинное сопротивление разрыву,  $S_k$**  – напряжение, определяемое отношением нагрузки  $P_k$  в момент разрыва к площади минимального поперечного сечения образца в момент разрыва  $F_k$ .

**Относительное удлинение после разрыва,  $\delta_{10}$**  – отношение приращения расчетной длины образца после разрыва к ее первоначальной величине.

**Относительное сужение после разрыва,** – отношение разности начальной площади и минимальной площади поперечного сечения образца после разрыва к начальной площади поперечного сечения образца.

## 2. Испытания на сжатие

Пластичные материалы на растяжение и на сжатие работают примерно одинаково и основным видом испытания для них является испытание на растяжение, а испытание на сжатие носит вспомогательный характер.

Хрупкие материалы (чугун, кирпич, раствор, бетон и др.) на сжатие работают значительно лучше, чем на растяжение (к примеру у бетона предел прочности на сжатие раз в 10 больше предела прочности на растяжение). В силу чего хрупкие материалы применяются в основном в сжатых элементах конструкций, поэтому основным видом испытаний хрупких материалов является испытание на сжатие.

Схема испытания на сжатие и геометрия используемых образцов показаны на рис. 5. Испытания проводят на тех же машинах, что и на растяжение. Образец устанавливают на опорную плиту в нижнем захвате и сжимают подвижным захватом. По мере сжатия на торцовых поверхностях образца возникают силы трения, направленные по радиусам к его центру и препятствующие деформации в горизонтальном направлении. В результате образец приобретает характерную бочкообразную форму, а схема напряжённого состояния усложняется и становится различной в разных точках. В точках 1 и 2, например, возникает схема объёмного сжатия, а в точке 3 – равномерное плоское напряжённое состояние. Результаты испытаний на сжатие зависят от условий проведения эксперимента. Практически очень трудно добиться приложения сжимающей силы точно по оси образца. Поэтому образец будет не только сжиматься, но и изгибаться. Чем длиннее образец,



тем больше влияние изгиба (попробуйте сжать длинный и тонкий прутик). Для уменьшения влияния изгиба рекомендуется применять образцы, длина которых не более чем в два раза превышает их поперечные размеры. Применение слишком коротких образцов тоже нежелательно. При сжатии образца продольные размеры уменьшаются, а поперечные увеличиваются (по закону Пуассона). Вследствие трения между торцами образца и опорными плитами машины увеличение поперечных размеров на середине и по краям образца неодинаковы (по краям меньше) и образец принимает бочкообразную форму, что у образцов из пластичных материалов видно невооруженным глазом.

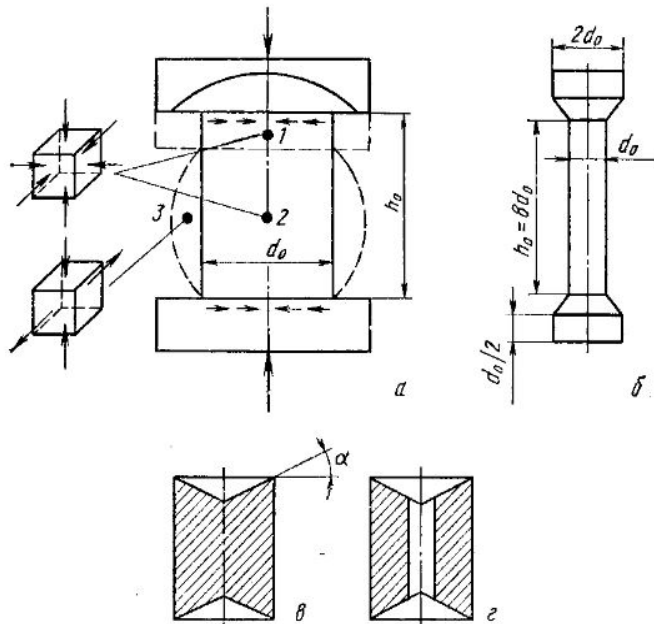


Рис. 101. Схема (а) и формы образцов (б-г) для испытания на сжатие

Рис. 5 - Схема (а) и формы образцов (б-г) для испытания на сжатие

На рис. 6 приведены диаграммы, полученные при испытании на сжатие цилиндрических образцов из среднеуглеродистой стали одинакового диаметра  $d_0$ , но с различным начальным отношением  $h_0/d_0$ .

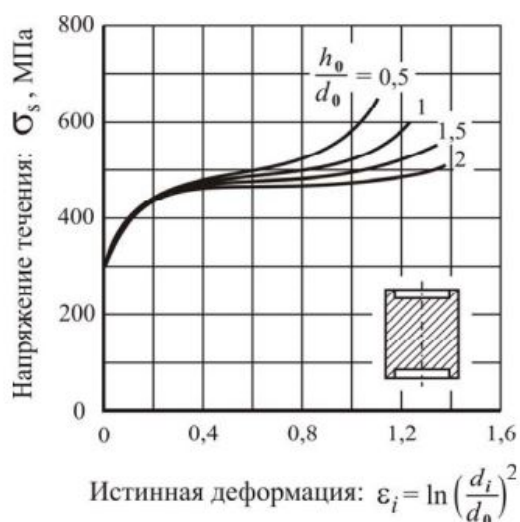


Рис. 6 - Диаграммы сжатия цилиндрических образцов из стали 45

Как видно из этих данных, при переходе от относительно длинных образцов с начальным отношением  $h_0/d_0 = 2$  к коротким образцам ( $h_0/d_0 = 0,5$ ) сопротивление пластическому деформированию существенно возрастает.

Для пластичных материалов величины пределов текучести, определенные из опытов на растяжение и сжатие, оказываются близкими друг к другу.

При сжатии образцов из хрупкого материала, разрушение происходит по плоскостям, параллельным оси образца или по плоскостям, наклоненным к оси под углом  $45^\circ$ , совпадающим с направлением площадок, по которым действуют максимальные касательные напряжения. Поэтому испытанию на сжатие подвергают главным образом хрупкие материалы, которые, как правило, лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению, и применяются для изготовления элементов, работающих на сжатие.

### 3. Испытания на изгиб

Испытание на изгиб — один из основных и широко распространенных видов испытания материалов — рекомендуется для определения механических свойств хрупких и малопластичных при растяжении металлов (чугунов, инструментальных сталей, литых сталей и сплавов), чувствительных к перекосу и требующих специальных мер его предотвращения при испытании на растяжение. Этот метод применяется, для оценки склонности к хрупкому разрушению высокопрочных сталей (метод «приборного изгиба»), а также при определении вязкости разрушения и чувствительности к острым трещинам.

Испытания на изгиб можно проводить на любой универсальной испытательной машине, используемой для испытаний на растяжение. Образец устанавливают на опорную плиту в нижнем захвате и деформируют изгибающим ножом, крепящимся в верхнем захвате машины. Образец изгибается при опускании верхнего или подъеме нижнего захвата. При этом на диаграммной ленте может быть записана диаграмма изгиба в координатах нагрузка  $P$  — стрела прогиба  $f$ . Для пластичного материала диаграмма выглядит так, как показана на рис. 10. Если материал хрупкий, то кривая обрывается в точке  $b$ . Знание величины нагрузок  $P_{\text{пл}}$ ,  $P_{\text{упр}}$ ,  $P_T$  и  $P_b$  позволяет определить пределы пропорциональности упругости, текучести и прочности на изгибе.

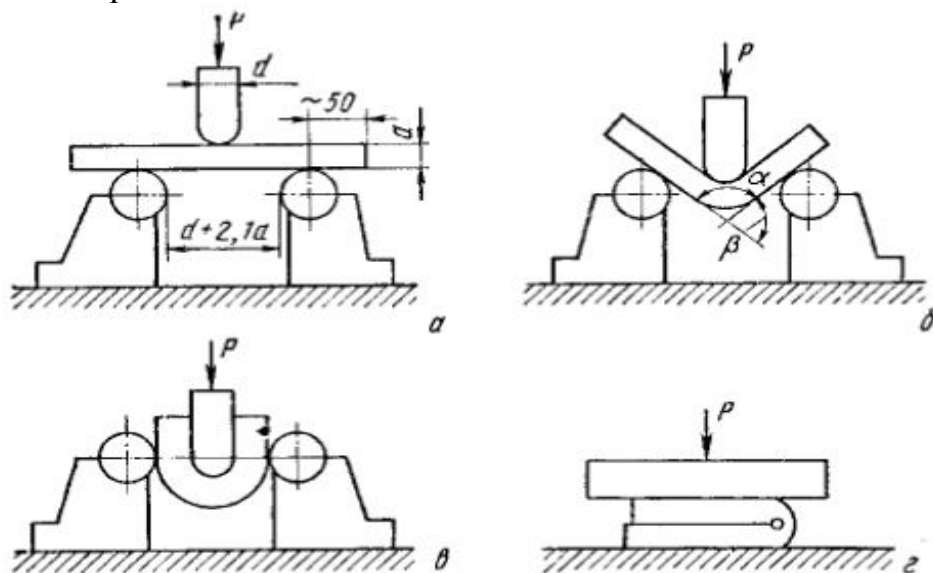


Рис. 107. Технологическая проба на изгиб:  
 а — образец перед испытанием; б — загиб до определенного угла; в — загиб до параллельности сторон; г — загиб до соприкосновения сторон

Рис. 7 - Технологическая проба на изгиб: а — образец перед испытанием; б — загиб до определённого угла; в — загиб до параллельности сторон; г — загиб до соприкосновения сторон

Образцы для испытаний на изгиб не имеют головок. Это еще одно преимущество по сравнению с растяжением, так как изготовление образцов с головками, особенно из хрупких материалов, значительно сложнее. На изгиб

испытывают прямоугольные или цилиндрические стержни. Для определения свойств отливок из чугуна используют цилиндрические образцы диаметром  $30 \pm 1$  и длиной 340 или 650 мм (при растяжении между опорами 300 и 600 мм соответственно). Для исследовательских целей испытания на изгиб обычно ведут на цилиндрических образцах с  $d_0 = 2-10$  мм и расстоянием между опорами  $l > d_0$  или плоских образцах с высотой  $b=1-3$ , шириной  $h=3-15$  мм и  $t \geq 10h$ . Для оценки характеристик конструкционной прочности рекомендуется применять образцы большого сечения до  $30 \times 30$  мм.

Сравнение полученных показателей дает возможность выбора стали, способной выдерживать больший изгиб и высокие нагрузки, а также обеспечить точность расчетов на прочность конструкций, работающих в условиях изгиба с растяжением.

Использование предлагаемого способа испытания позволяет получить достоверные значения механических характеристик и обеспечить повышение точности расчетов на прочность конструкций, работающих в условиях изгиба с растяжением, в том числе труб, эксплуатирующихся в условиях наклонных скважин, а также проволоки, профиля и труб при изготовлении с намоткой на барабан.

#### **4. Испытания на кручение**

Испытание на кручение является одним из основных методов определения механических свойств Материалов, используемых в деталях, работающих на кручение. Этим методом можно также оценивать пластичность материалов, хрупких при растяжении; Определение при испытании на кручение модуля сдвига  $G$  позволяет вычислить коэффициент Пуассона  $\mu$ . В отличие от растяжения при кручении форма образца практически не изменяется даже при очень больших деформациях, что облегчает оценку напряжений и деформаций в этой области. Испытания на кручение позволяют наиболее строго в сравнении с другими видами механических испытаний дифференцировать характер разрушения.

На кручение испытываются, как правило, цилиндрические образцы сплошного круглого, реже — трубчатого сечения, иногда для специальных целей — квадратного или иной формы сечения. Головкам образцов придают квадратную форму или круглую с лысками.

При испытании к утолщенным головкам образца прикладываются два равных по величине и взаимно противоположных по направлению момента вращения, действующих в плоскостях, нормальных к оси. При этом в рабочей части образца создается плоское напряженное состояние чистого сдвига. В поперечных сечениях действуют только касательные напряжения, наибольшие у поверхности; такие же касательные напряжения действуют в продольных сечениях образца, проходящих через его ось. В сечениях, наклоненных к оси, возникают нормальные напряжения (растягивающие — в одном направлении и сжимающие - в перпендикулярном); наибольшие, главные (нормальные) напряжения действуют у поверхности по площадкам, наклоненным под углом  $45^\circ$  к оси, они равны по величине наибольшим касательным напряжениям.

Различно ориентированные при кручении плоскости действия наибольших касательных и нормальных напряжений позволяют отчетливо отличить разрушение от среза и от отрыва (рис. 8) и соответственно определить величины сопротивления срезу и сопротивления отрыву, как это сделано, например, при определении сопротивления разрушению (отрыву или срезу) в зависимости от содержания углерода в стали. Хрупкое состояние материала характеризуется появлением

трещины и распространением разрушения по винтовой поверхности. Пластичные материалы разрушаются от сдвига, как правило, в плоскости поперечного сечения образца. Дополнительные расслоения и разрушения по продольному направлению свидетельствуют о неоднородности структуры материала.

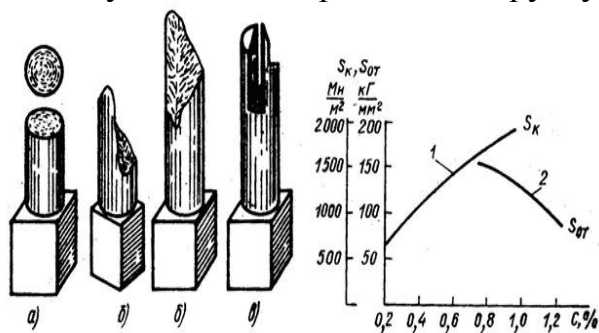


Рис. 2. Типы разрушения при кручении:  
а—от среза; б—от отрыва; в—при неоднородной структуре

Рис. 3. Зависимость сопротивления разрушению при кручении от содержания углерода в стали:  
1—разрушение по плоскостям действия  $\tau_{max}$ ; 2—разрушение по плоскостям действия  $S_{max}$

Рис. 8 - Типы разрушения при кручении: а – от среза; б – от отрыва; в – при неоднородной структуре

Испытания на кручение осуществляется на машинах с механическим приводом, преимущественно с горизонтальным расположением образца, обеспечивающих надёжную центровку образца и гарантирующих отсутствие изгибающих усилий, возможность достаточно точного задания и измерения величины крутящего момента. Максимальный крутящий момент изменяется от 60Нм до 2МНм. В качестве меры деформации в процессе испытания фиксируется угол закручивания  $\phi$ .

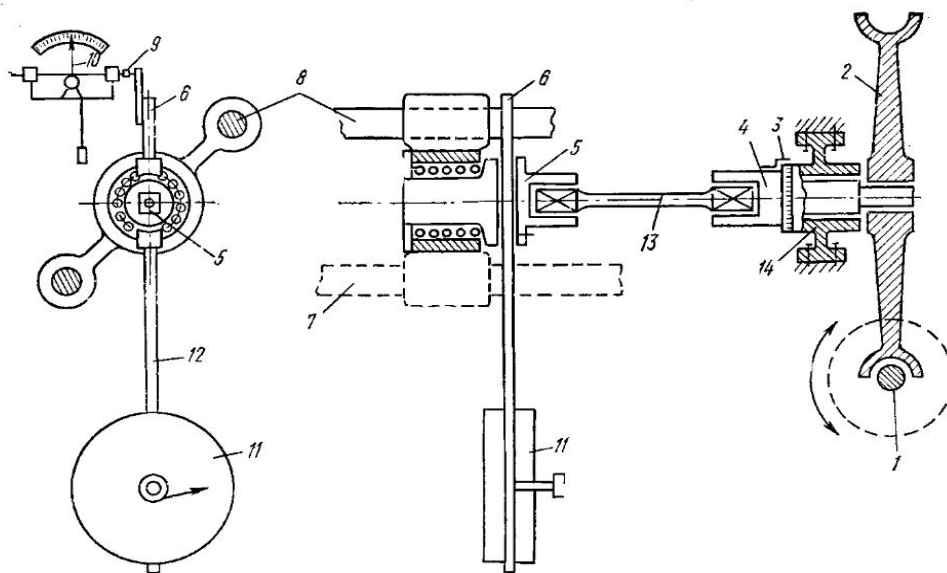


Рис. 109. Схема горизонтальной машины для испытаний на кручение

Рис. 9 - Схема горизонтальной машины для испытаний на кручение

На рис. 9 дана принципиальная схема горизонтальной испытательной машины с маятниковым силоизмерителем. Образец 13 крепится в захватах 4 и 5. Левый захват не связан с приводом и может перемещаться в горизонтальном направлении по направляющим 7 и 8. Правый захват устанавливается в неподвижном подшипнике 14 и получает вращение от червячного колеса 2, приводимого в движение электродвигателем через редуктор и вал 1. Число оборотов и угол закручивания активного захвата 45 можно определить по неподвижной круговой шкале с помощью указателя 3, который вращается вместе с захватом. второй захват

5 жестко связан с тяжелым маятником 11. Меняя груз или переставляя штангу 12 в вертикальное положение относительно захвата, можно менять масштаб шкалы силоизмерителя. Вращение захвата 5 вместе с маятником 11 создаёт крутящий момент, направленный противоположно этому вращению и равный моменту кручения, переданному на образец активным захватом 4. Отклонение маятника 11 от вертикального положения приводит к перемещению конца 6 штанги 12, затем стержня 9 и стрелки 10 силоизмерителя. Перемещение стрелки прямо пропорционально моменту кручения  $M_{кр}$ , который служит мерой сопротивления образца деформации, заменяя при кручении усилие  $P$ , измерявшееся в других статических испытаниях.

### 3. Методы определения твёрдости материалов

**Твёрдость** называется свойство материала оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела (индентора), не испытывающего остаточной деформации. Внедряемый (вдавливаемый) индентор имеет определенную форму и размеры и не должен получать остаточную деформацию от действия прикладываемых к нему статических или динамических нагрузок. Измерение твердости является одним из самых распространенных и доступных методов механических испытаний, который широко используется в исследовательских целях и как средство (способ) контроля качества свойств материалов в производстве. В отличие от других испытания на твердость очень разнообразны и отличаются друг от друга по форме используемого индентора, условиям приложения нагрузки, способам расчета величины твердости, времени нагружения, твердости испытываемого материала, размеров детали (образца), толщины слоя, твердость которого нужно измерить и т. д. В зависимости от этих факторов твердость может характеризовать упругие и упруго-пластические свойства, сопротивление малым или большим деформациям, а также разрушению. Общим моментом для них является приложение нагрузки при контакте индентора и испытываемого материала. Условия определения твердости, требования к оборудованию, приборам и образцам и т. д. регламентируются государственными стандартами (ГОСТами).

Оценивается твердость так называемыми **числами твердости**, размерность которых определяется принципом измерения. Числа твердости являются вторичными, производными характеристиками механических свойств, зависящими от первичных, основных – модуля упругости, временного сопротивления и др., от продолжительности действия нагрузки, от способа испытаний и вычисления твердости. Поэтому сравнимые результаты, даже в пределах одного метода, получаются при строгой регламентации процедуры испытаний, которая часто определяется стандартом. Числа твердости для одного и того же материала, определяемые различными способами, получаются различным как по величине, так и по размерности. С помощью специальных таблиц, номограмм или эмпирических формул можно осуществлять пересчет чисел твердости.

В настоящее время существует около 30 разновидностей испытаний на твердость, но наибольшее распространение получили три из них – это методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, а также метод измерения микротвердости. Во всех случаях контакт осуществляется вдавливанием индентора определенной формы и размера со степенью деформации 30...40%. При этом реализуется состояние всестороннего неравномерного сжатия с коэффициентом

“мягкости”  $\alpha > 2$ , что позволяет производить оценку твердости практически любых, в том числе и очень хрупких материалов.

Учитывая неизбежный разброс значений твердости, обусловленный как ошибками измерения, так и неоднородностью механических свойств материала, испытаниям подвергается обычно несколько образцов, а на каждом образце делают несколько вдавливаний индентора. Затем проводят статистическую обработку результатов испытаний, без которой нельзя делать достоверные выводы. При этом число измерений принято называть «выборкой».

#### ***Испытание на твердость – 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  $\sigma_v$ . 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 влияют на их работоспособность и, что особенно ценно, относятся к неразрушающим методам механических испытаний.

#### ***Измерение твердости по методу Бринелля***

Бринелль (*Brinell*) Юхан Август (1849–1925), шведский инженер. Труды по металлургии стали и определению твердости металлов и сплавов. Метод определения твердости металлов, названный его именем, предложил в 1900 г.

Метод измерения твердости металлов по Бринеллю заключается во вдавливании индентора (шарика) стального или из твердого сплава диаметром  $D$  в образец (изделие) под действием силы, приложенной перпендикулярно поверхности образца в течение определенного времени, и измерении диаметра отпечатка  $d$  после снятия силы (рис. 10).

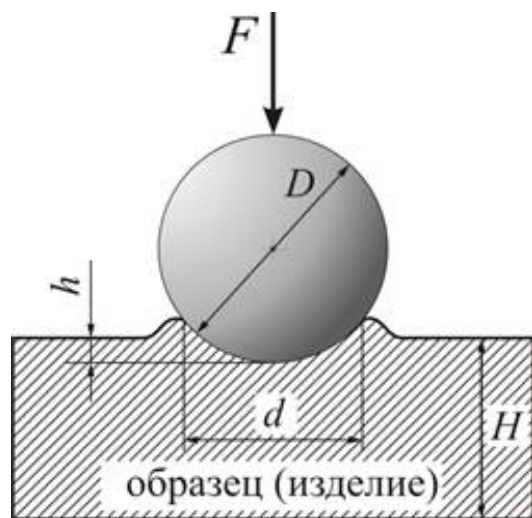


Рис. 10 - Вид деформированного образца после вдавливания шарика

Измерение твердости по методу Бринелля осуществляется на твердомере типа ТВ 5004 в соответствии с ГОСТом 23677-79. В качестве индентора применяются шарики диаметром 1; 2,5; 5,0 и 10 мм, изготовленные из термически обработанной высокоуглеродистой стали с чистой поверхностью по двенадцатому классу (ГОСТ 2789-73). Выбор диаметра шарика, нагрузки и времени нагружения производится по таблице 1.

Показателем твердости является число твердости по Бринеллю, обозначаемое  $HВ$  и представляющее собой отношение усилия  $F$  к площади поверхности шарового сегмента  $A$ .

Твердость по Бринеллю выражается в  $кГ/мм^2$ , но по стандарту размерность обычно не записывается. В то же время в системе СИ она указывается – МПа. Верхний предел измерения твердости этим методом составляет  $HВ 450$ , так как при испытании более твердых материалов происходит деформация шарика, превышающая стандартизированный допуск.

Для получения одинаковых значений твердости при испытаниях одного и того же металла инденторами разных диаметров необходимо, чтобы соблюдалось соотношение между размером шарика и действующей на него нагрузкой  $K=F/D^2$ . Отношение  $K$  подбирается из ряда значений, приводимых в ГОСТе, с учетом свойств испытуемого металла так, чтобы соотношение между диаметрами шарика и отпечатка было в некотором диапазоне ( $d/D=0,24...0,6$ ). Например, для сталей и высокопрочных сплавов ГОСТ рекомендует принимать отношение  $K=30$ , для цветных металлов и сплавов принимают  $K=10$ , а для очень мягких металлов  $K=2,5$  (подшипниковые сплавы) или  $K=1$  (свинец, олово).

На практике по диаметру  $d$  отпечатка находят число твердости  $HВ$ , используя таблицы, составленные для каждого из рекомендуемых соотношений  $F$  и  $D$ . Современное оборудование позволяет находить твердость по-другому, – определяя глубину  $h$  внедрения шарика (см. рис. 1).

Пластическое деформирование материала в окрестности внедряемого индентора связано со структурными изменениями, происходящими в металле. Длительность протекания этих изменений зависит от свойств материала. Для черных металлов достаточно 10...15 секунд выдержки под нагрузкой, для большинства цветных – 30 секунд. В некоторых случаях для завершения пластического течения устанавливают 180 секунд или особо оговаривают условия испытания.

Когда твердость испытуемого металла соизмерима с твердостью индентора – стального шарика, то вследствие деформации шарика искажается форма отпечатка, что влияет на точность результатов. Во избежание существенных ошибок (из-за смятия шарика) обычно вводится ограничение на применение метода Бринелля: испытывают материалы с твердостью, не превышающей 450 *HB*. Для испытаний более твердых материалов используют либо шарик из твердого сплава, либо другие методы, например, Виккерса или Роквелла, где индентором служит алмаз – самый твердый материал из известных в природе.

Твердость по Бринеллю обозначают символом *HB* (*Hardness Brinell*) или *HBW* (*Hardness Brinell Wolfram carbide*):

- *HB* – при применении стального шарика (твердость детали менее 450 единиц);
- *HBW* – при применении шарика из твердого сплава (твердость детали более 450 единиц).

Символу *HB* (*HBW*) предшествует числовое значение твердости (с округлением до трех значащих разрядов), а после символа указывают диаметр шарика [мм], значение приложенной силы [кгс], продолжительность выдержки [с], если она отличается от 10 или 15 секунд.

**Примеры обозначений:**

- 250 *HB* 5/750 – твердость по Бринеллю 250, измеренная стальным шариком диаметром 5 мм, при нагрузке 750 кгс (7355 Н) и продолжительности выдержки 10-15 с;
- 575 *HBW* 2,5/187,5/30 – твердость по Бринеллю 575, измеренная шариком из твердого сплава диаметром 2,5 мм, при нагрузке 187,5 кгс (1839 Н) и продолжительности выдержки под нагрузкой 30 с.

При определении твердости стальным шариком (или шариком из твердого сплава) диаметром 10 мм при нагрузке 3000 кгс (29420 Н) и продолжительности выдержки 10...15 секунд твердость по Бринеллю обозначают только числовым значением твердости и символом *HB* или *HBW* (например, 300 *HB*).

**Устройство и принцип работы прибора Бринелля**

На рис. 11 приведена принципиальная схема твердомера ТБ 5004.

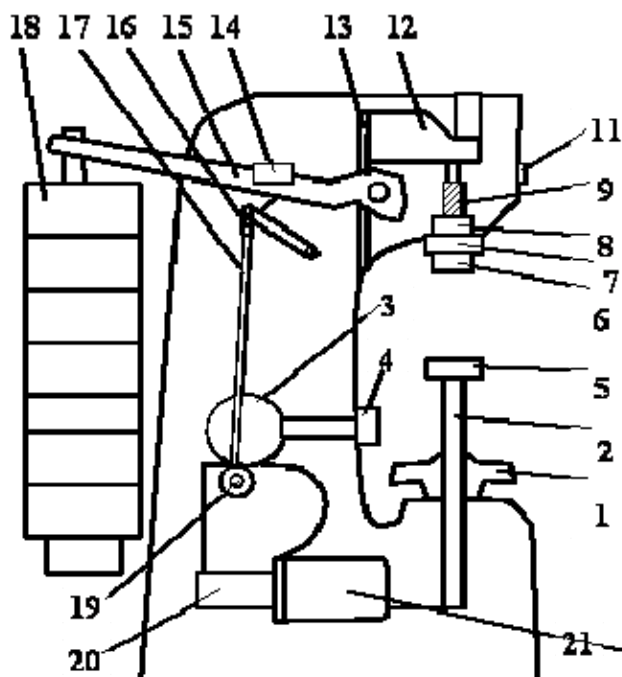


Рис. 11 - Схема прибора для определения твердости по Бринеллю



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”.

Требования к образцам и приборам при определении твердости оговариваются соответствующими ГОСТами.

Стандарты предусматривают следующие основные требования при измерении твердости.

1) Поверхность испытуемого образца должна быть тщательно подготовлена и свободна от окалины и других посторонних веществ. При подготовке поверхности надо принять меры предосторожности против возможного наклепа или нагрева поверхностного слоя в результате механической обработки.

2) Испытуемый образец должен быть без короблений и лежать на столике прибора устойчиво. Необходимо обращать особое внимание на качество поверхности образца не только со стороны внедрения индентора, но и с обратной стороны, которой он кладется на предметный столик прибора – она должна быть ровной, без местных выступов (например, не допускается с этой стороны наличие даже мелких отпечатков от шарика, конуса или пирамиды). Это объясняется тем, что под действием нагрузки выступы будут сминаться, что приведет к кажущемуся уменьшению твердости в результате увеличения размера  $h$ . Требования этого пункта имеют особое значение при определении твердости по Роквеллу.

На приборе Бринелля проводятся 5 замеров. Образец с нанесенными отпечатками снимается с предметного столика прессы Бринелля. Измерение диаметров отпечатков производится с помощью специального отсчетного микроскопа на лабораторном столе. На рис. 3 показано изображение отпечатка, видимое в микроскоп (увеличение микроскопа обычно равно 24). Один из краев отпечатка необходимо совместить с нулевым штрихом шкалы и произвести отсчет по шкале с точностью до 1/2 деления. Видимое в микроскоп расстояние между большими штрихами соответствует одному миллиметру. Полученный размер диаметра отпечатка записывают сразу в миллиметрах. Так, на рис. 3 имеем:  $d=3,40$  мм.

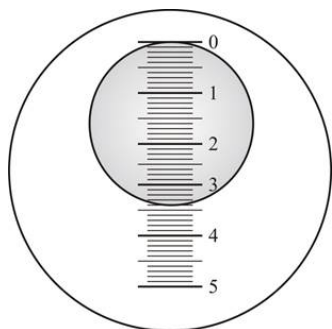


Рис. 12 - Изображение отпечатка, видимое в микроскоп

Определение *НВ* по диаметру отпечатка предлагается провести с помощью таблиц или рассчитать по формуле (5).

### **Измерение твердости по методу Роквелла**

Назван по имени американского металлурга С. П. Роквелла (*S. P. Rockwell*).

Метод Роквелла был предложен в 1920 г. и в настоящее время получил самое широкое распространение. Это объясняется, во-первых, упрощенной процедурой определения твердости, когда число твердости считывается непосредственно со шкалы прибора, а во-вторых, его универсальностью – с его помощью можно испытывать массивные и тонкие образцы из твердых и мягких материалов. В качестве индентора используется алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом закругления 0,2 мм (шкалы А и С) и стальной шарик диаметром 1,5875 мм (1/16 дюйма) (шкала В). Процесс нагружения осуществляется под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок – предварительной  $F_0=98$  Н (10кГс) и общей  $F_1$ .

Предварительная нагрузка подается вручную и не снимается до конца испытаний, что обеспечивает повышенную точность измерений, т.к. исключается влияние вибраций и поверхностного слоя.

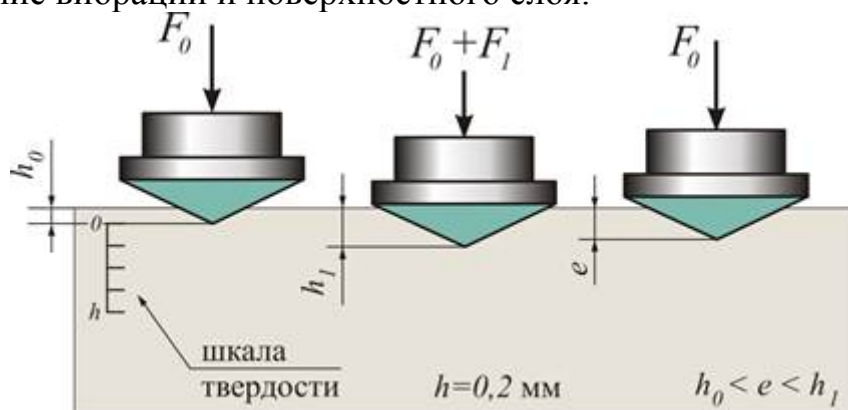


Рис. 13 - Схема определения твердости методом Роквелла (шкалы А и С)

**Измерение твердости по шкале С.** Если индентор внедрится в материал на глубину  $h=0,2$  мм, то твердость такого материала условно считается равной нулю. Если же под действием той же нагрузки  $F$  индентор не внедряется в материал (пластическая деформация равна нулю), то твердость такого материала принято считать равной 100 единицам Роквелла. Таким образом, за единицу твердости принята величина, соответствующая перемещению индентора на 0,002 мм. Применение такой «перевернутой» шкалы (рис. 2) обосновано тем, что глубина внедрения индентора обратно пропорциональна твердости материала. Поэтому твердость материала будет характеризоваться величиной  $(h-e, \text{мм})$  или числом делений по шкале:

Единица Роквелла (в отличие от единиц Бринелля и Виккерса) оказывается величиной безразмерной.

**Измерение твердости по шкале А.** Шкалу А (идентична шкале С) применяют для измерения твердости преимущественно листовых материалов. Из-за снижения нагрузки на индентор в 2,5 раза и уменьшения вследствие этого глубины проникновения индентора минимальную толщину испытуемого образца или изделия удастся снизить до 0,4...0,7 мм.

**Измерение твердости по шкале В.** Для многих мягких металлов и сплавов внедрение алмазного конуса может оказаться большим, чем 0,2 мм. В этом случае число твердости, вычисляемое по формуле (6), станет отрицательным (поскольку

$h < e$ ), что лишено физического смысла и не может характеризовать твердость материала. В этих случаях применяют следующие меры:

- заменяют конический индентор на сферический;
- снижают нагрузку на индентор в 1,5 раза (со 150 кгс до 100 кгс);
- смещают шкалу на 30 единиц (шкала *B* красного цвета).

Шкала *B* применяется для измерения твердости не закаленной стали, бронзы, латуни и других нетвердых материалов. Для твердых – например, закаленные стали, используется шкала *C*, вдавливание осуществляется алмазным конусом под нагрузкой 1470 Н (150 кгс). Испытания очень твердых материалов и тонких поверхностных слоев также осуществляется алмазным конусом, но по шкале *A* под нагрузкой 588 Н (60 кгс). К достоинствам метода относится простота определения твердости, высокая производительность, возможность полной автоматизации процедуры испытаний. К недостаткам – мног шкальность, отсутствие геометрического подобия отпечатков, условность и безразмерность величины *HR*, сравнительно низкая чувствительность. Все эти факторы делают метод Роквелла лишь средством быстрого упрощенного технического контроля.

Твердость указывается в единицах *HR* (*Hardness Rockwell*) с добавлением обозначения шкалы (*HRA*, *HRB*, *HRC*), которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр.

**Пример обозначения:** 61 *HRC* – твердость 61 единиц Роквелла по шкале *C*.

**Замечание о переводе чисел твердости.** Во всех упомянутых выше государственных стандартах указано, что **общего точного перевода чисел твердости, измеренных различными методами (или определения прочности по твердости), не существует.** Однако результаты проведенных многочисленных экспериментов указывают на то, что имеются, хотя и приближенные, но достаточно устойчивые зависимости.

#### **Устройство прибора Роквелла**

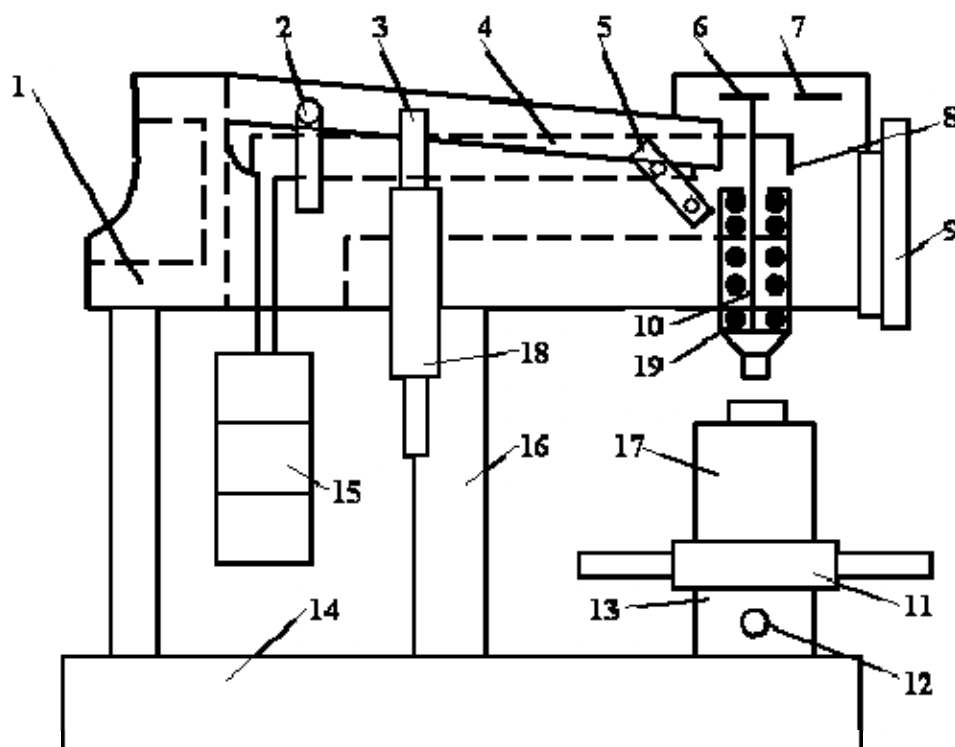


Рис. 14 - Прибор для измерения твердости по Роквеллу

На рис.14 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.

### ***Измерение твердости по методу Виккерса***

Название от английского военно-промышленного концерна «*Vickers Limited*».

Испытание твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999-75) применяется для измерения твердости черных и цветных металлов и сплавов и производится путем (рис. 15) вдавливания четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине  $\alpha=136^\circ$  под действием силы, приложенной в течение определенного времени, и измерении длин обеих диагоналей отпечатка, оставшегося на поверхности образца после снятия нагрузки.

В зависимости от твердости и толщины металла применяют нагрузки 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 кгс. Поверхность образца должна быть отполирована.

Метод Виккерса является одним из наиболее совершенных и распространенных в лабораторной практике методов определения твердости. Высокая твердость и недеформируемость алмаза обеспечивает большую точность определения твердости. Это особенно важно при испытании твердых материалов (более  $500 \text{ кгс/мм}^2 \approx 4904 \text{ Н}$ ). Ценность метода состоит также в том, что вследствие малых нагрузок вдавливания удается испытывать тонкие образцы, а также определять твердость непосредственно поверхностных слоев (например, поверхности азотированной стали). Можно определять твердость мелких готовых изделий, не разрушая и не портя их вследствие малой величины отпечатка.

Твердость по Виккерсу указывается в единицах *HV* (*Hardness Vickers*) и определяется как частное от деления нагрузки  $F$  [кгс], приложенной к пирамиде, на площадь поверхности отпечатка  $A$  [ $\text{мм}^2$ ], т. е. к поверхности углубления в форме пирамиды

Твердость по Виккерсу при силовом воздействии 30 кгс (294,2 Н) и времени выдержки под нагрузкой 10...15 секунд обозначают цифрами, характеризующими величину твердости и буквами *HV*. При этом окончательный результат принято округлять до трех значащих разрядов (как и по Бринеллю).

***Пример обозначения:*** 500 *HV* – твердость по Виккерсу, измеренная при нагрузке 30 кгс и времени выдержки 10...15 секунд.

При других условиях испытания после букв *HV* указывают нагрузку и время выдержки.

***Пример обозначения:*** 220 *HV* 10/40 – твердость по Виккерсу, измеренная при нагрузке 10 кгс (98,07 Н) и времени выдержки 40 секунд.

Числа твердости по Бринеллю и по Виккерсу имеют одинаковую размерность ( $\text{кгс/мм}^2$ ) и до *HV* 350...400 их величины совпадают между собой. При *HV* больше 400 твердость по Бринеллю оказывается заниженной. Для получения точных результатов при измерении твердости по Виккерсу необходимо строго соблюдать следующие условия:

- отношение толщины образца к диагонали отпечатка должно быть не менее 1,5;

- отношение глубины отпечатка к его диагоналям –  $1/7$ ;
- расстояние между центром и краем образца, а также краем соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 диагоналей отпечатка;
- испытания проводить на тщательно отшлифованной или полированной поверхности.

На приборе Виккерса можно измерять твердость образцов толщиной до 0,3...0,5 мм или поверхностных слоев толщиной до 0,03...0,05 мм. Однако следует учитывать, что при небольшой нагрузке (1 кгс) отпечаток пирамиды может быть недостаточно отчетливым. Поэтому при измерении твердости очень тонких поверхностных слоев, например, цианированного слоя толщиной 0,04...0,06 мм, лучше применять нагрузку 5 кгс, а для измерения твердости азотированного слоя стали толщиной до 0,05 мм – нагрузку 5 или 10 кгс. При обозначении твердости по Виккерсу указывают величину применяемой нагрузки: HV5, HV10 и т. д. При испытании твердых и других слоев (азотированного, цианированного) около углов отпечатка иногда появляются трещины, по виду которых можно судить о хрупкости исследуемого слоя.

Несмотря на преимущество метода Виккерса, дающего возможность измерять как мягкие, так и твердые материалы различной толщины, измерение твердости занимает много времени и требует тщательной подготовки поверхности. Указанный недостаток препятствует широкому применению данного метода в условиях массового контроля.

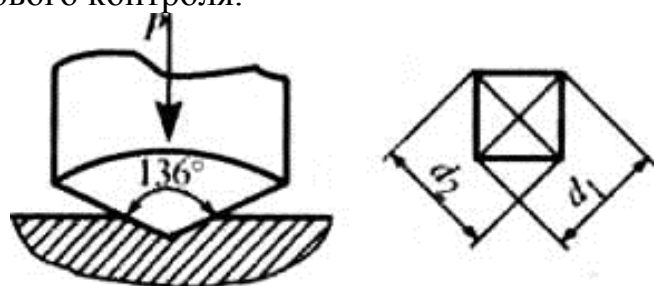


Рис. 15 - Схема измерения твёрдости по Виккерсу

Вопросы для контроля:

1. Что такое механические свойства металлов? Что к ним относится?
2. Какие методы определения механических свойств материалов существуют?
3. Расскажите про испытания на сжатие и растяжение. В чём их различие? Для чего применяются?
4. Назовите особенности испытаний на изгиб.
5. Что такое испытание на кручение?
6. Что такое твёрдость материала?
7. Какие методы испытания твёрдости существуют? Расскажите про каждый вид.
8. В чём отличие этих методов?