

**Лекция 3.** Механические свойства.

**3.1. Прочность.**

Прочность – способность тела (металла) сопротивляться деформациям и разрушению. Большинство технических характеристик прочности определяют в результате статического испытания на растяжение. Образец, закрепленный в захватах разрывной машины, деформируется при статической, плавно возрастающей нагрузке со скоростью 2-15 мм/мин. При испытании, как правило, автоматически записывается диаграмма растяжения, выражающая зависимость между нагрузкой и деформацией. Небольшие деформации с очень большой точностью определяются тензотрами.

Чтобы исключить влияние размеров образцов, испытания на растяжение проводят на стандартных образцах с определенным соотношением между расчетной длиной  $l_0$  и площадью поперечного сечения  $F_0$ .

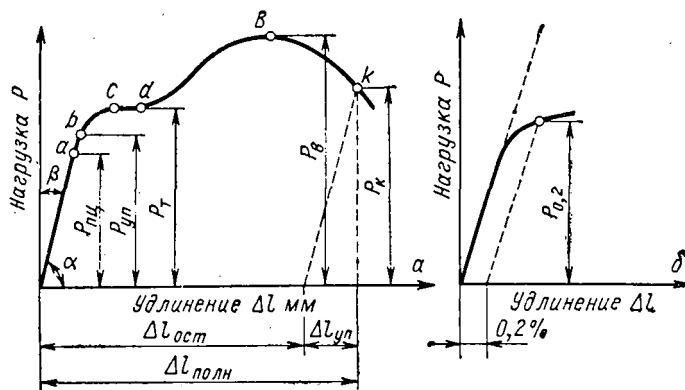


Рис.1

На рис.1 приведена диаграмма растяжения малоуглеродистой отожженной стали. При нагрузке, соответствующей начальной части диаграммы, материал испытывает только упругую деформацию, которая полностью исчезает после снятия нагрузки. До точки *a* эта деформация пропорциональна действующему напряжению (нагрузке), что выражается законом Гука:  $\sigma = E\Delta l/l_0$  [ $\sigma = P/F_0$  — напряжение в материале, МН/м<sup>2</sup>;  $P$  — приложенная нагрузка, МН;  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца, мм;  $\Delta l$  — абсолютное удлинение, мм;  $l_0$  — начальная длина образца, мм].

Коэффициент пропорциональности  $E$  (графически равный  $tg \alpha$ ) характеризующий упругие свойства материала, называется модулем нормальной упругости. При заданной величине напряжения с увеличением модуля уменьшается величина упругой деформации, т.е. возрастает жесткость (устойчивость) конструкции (изделия). Поэтому модуль  $E$  также называют модулем жесткости. Величина модуля зависит от природы сплава и очень мало изменяется при изменении его состава, структуры, термической обработки.

Важнейшей характеристикой упругой прочности является предел упругости.

*Теоретический предел упругости* — максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию, т.е.  $\sigma_{yn} = P_{yn}/F_0$  (рис. 1).

Если действующее напряжение в детали (конструкции) будет меньше  $\sigma_{yn}$ , материал будет работать в области упругих деформаций. Ввиду трудности определения  $\sigma_{yn}$  практически пользуются *условным пределом упругости*, под которым понимают напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,005—0,05% от начальной расчетной длины образца. В обозначении условного предела упругости указывается величина остаточной деформации, например  $\sigma_{0,005}$ .

Нагрузке в точке **a**, определяющей конец прямолинейного участка диаграммы растяжения, соответствует предел пропорциональности.

*Теоретический предел пропорциональности* — максимальное напряжение, до которого сохраняется линейная зависимость между напряжением (нагрузкой) и деформацией  $\sigma_{\text{ли}} = P_{\text{ли}}/F_0$ .

Так как при определении положения точки **a** на диаграмме могут быть погрешности, обычно пользуются *условным пределом пропорциональности*, под которым понимают напряжение, вызывающее определенную величину отклонения от линейной зависимости, например  $\text{tg } \alpha$  изменяется на 50% от своего первоначального значения. Для большинства материалов теоретические пределы упругости и пропорциональности близки по величине. Для некоторых материалов, например меди, предел упругости больше предела пропорциональности.

Прочность материала, как сопротивление небольшим пластическим деформациям, характеризуется пределом текучести. *Физический предел текучести* — напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке.

На диаграмме растяжения пределу текучести соответствует участок **c** — **d**: пластическая деформация (удлинение) — «течение» металла при постоянной нагрузке.

Большая часть технических металлов и сплавов не имеет площадки текучести. Для них наиболее часто определяется *условный предел текучести*, под которым понимают напряжение, вызывающее остаточную деформацию  $\Delta l = 0.2\% l_0$ , т.е. равную 0.2% от начальной расчетной длины образца.

При дальнейшем нагружении пластическая деформация все больше увеличивается, равномерно распределяясь по всему объему образца. В точке **B** нагрузка достигает максимального значения, в наиболее слабом месте образца начинается образование «шейки» — сужения поперечного сечения, деформация из равномерной переходит в местную. Напряжение в материале в этот момент испытания называют *пределом прочности* (или пределом временного сопротивления разрушению). Предел прочности  $\sigma_s$  — напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения.

По своей физической сущности предел прочности характеризует прочность, как сопротивление значительной равномерной пластической деформации. За точкой **B** (см. рис. 1) в связи с развитием шейки нагрузка уменьшается, в точке **K** при нагрузке  $P_k$  происходит разрушение образца.

### 3.2. Пластичность.

*Пластичность* — способность тела (металла) получать остаточное изменение формы и размеров без нарушения сплошности. Это свойство металлов используют при обработке металлов давлением. Материалы с повышенной пластичностью менее чувствительны к концентраторам напряжений и другим факторам охрупчивания.

К характеристикам пластичности следует прежде всего отнести относительное удлинение и относительное сужение, определяемые при испытаниях на растяжение.

*Относительное удлинение:*

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100\%,$$

*Относительное сужение:*

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%,$$

### 3.3. Твердость.

*Твердость материала* — сопротивление проникновению в его поверхность стандартного тела — наконечника (индентора), например шарика, конуса и т.п., не деформирующегося при вдавливании.

Твердость измеряют многими методами, например вдавливанием наконечника, царапанием испытуемой поверхности алмазным острием под определенной нагрузкой и т.д. Общим для всех методов определения твердости является создание местных контактных напряжений при воздействии стандартного наконечника на испытуемую поверхность. Методы измерения твердости получили широкое применение благодаря скорости и простоте, портативности оборудования, а также возможности проводить испытания на готовых деталях (изделиях) без их разрушения.

Наибольшее распространение в практике получили методы Бринеля (ГОСТ 9012—59), Роквелла (ГОСТ 9013—59), Виккерса (ГОСТ 2999—59) и метод микротвердости (ГОСТ 9450—60).

*Твердость по Бринелю* определяют статическим вдавливанием в испытуемую поверхность под нагрузкой  $P$  стального закаленного шарика диаметром  $D$  (рис. 2, а). Число твердости  $HB$  определяют отношением нагрузки  $P$  к сферической поверхности отпечатка — шарового сегмента, диаметром  $d$ .

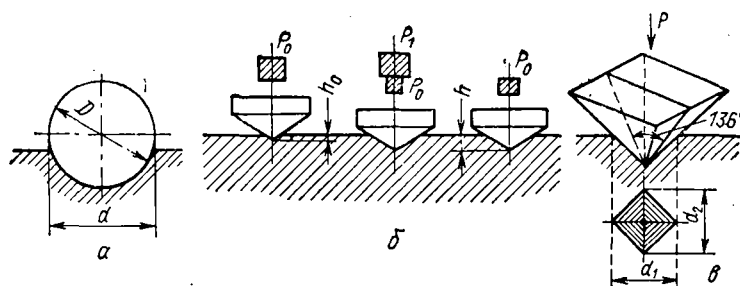


Схема определения твердости по Бринелю (а), по Роквеллу (б), по Виккерсу (в)

Рис.2

При испытании часто принимают  $D = 10 \text{ мм}$ ,  $P = 30\,000 \text{ Н}$  (3000 кгс),  $\tau = 10 \text{ с}$ . Число твердости обозначается  $250 \text{ HB}$ ,  $300 \text{ HB}$  и т.д. Размерность числа твердости (кгс/мм<sup>2</sup>), как правило, не указывают. Число твердости обозначают  $HB \{D\}/\{P\}/\{\tau\}$ , например  $HB 5/250/30 = 80$ . Это значит, что твердость 80 измерена шариком  $D = 5 \text{ мм}$  при нагрузке  $P = 2500 \text{ Н}$  (250 кгс) и продолжительности выдержки  $\tau = 30 \text{ с}$ .

Достоинства метода Бринеля — достаточная быстрота испытания, простота и надежность конструкции испытательного прибора (пресса, Бринеля), отсутствие необходимости тщательной подготовки поверхности для измерения. По физической сущности твердость по Бринелю является напряжением и выражает сопротивление значительной пластической деформации так же, как, например, предел прочности при растяжении. Поэтому между твердостью  $HB$  и  $\sigma_s$  существует простая линейная зависимость  $\sigma_s = k HB$ . Коэффициент  $k$  зависит от природы материала.

К недостаткам следует отнести невозможность испытания материалов с твердостью более 450 HB, что объясняется деформацией наконечника — стального шарика. Применение шариков, изготовленных из особо твердых сплавов, позволяет измерять твердость, достигающую значений 740 HB. Метод непригоден для измерения твердости тонких листов, лент, изделий с твердым поверхностным слоем (цементированных и т.п.).

*Метод Роквелла* основан на статическом вдавливании в испытуемую поверхность наконечника под определенной нагрузкой (рис. 2, б). Значение твердости определяют по глубине (мм) остаточного вдавливания наконечника и измеряют в условных единицах. В качестве наконечников применяют для отожженной стали и других материалов средней

твердости (до 230 НВ) стальной шарик  $D = 1.59 \text{ мм}$  и для материалов более высокой твердости алмазный конус с углом при вершине  $180^\circ$ .

Индикатор-глубиномер имеет две шкалы. При применении алмазного конуса с нагрузкой  $P = 1500 \text{ Н}$  (150 кгс) измерение проводят по черной шкале С, при использовании стального шарика с нагрузкой  $P = 1000 \text{ Н}$  (100 кгс) — по красной шкале В. Названия шкал даны в соответствии с типом наконечника, по начальным буквам английских слов: cone (конус) и ball (шар). Стрелка индикатора указывает число твердости. В соответствии с условиями испытаний (тип наконечника, нагрузка) и шкалой измерения числа твердости обозначают: 30 HRB; 60 HRC; 80 HRA и т.д.

Преимуществом способа Роквелла является быстрота измерений. Применение алмазного конуса позволяет измерять твердость закаленной стали и других очень твердых материалов. Пользуясь методом Роквелла, можно измерить твердость тонких изделий или поверхностного слоя толщиной до 0.4 мм (шкала А) и до 0.7 мм (шкалы В и С).

Недостаток измерения твердости по методу Роквелла заключается в том, что необходима тщательная подготовка поверхности — шлифование. На приборе Роквелла, где глубина отпечатка мала и ее измеряют с точностью до 0.002 мм (цена деления — условная единица твердости), могут оказывать влияние загрязненность, вибрация и другие условия производства.

*Твердость по Виккерсу* определяют путем статического вдавливания в испытуемую поверхность алмазной четырехгранной пирамиды с углом  $\alpha = 136^\circ$  между противоположными гранями (рис. 2, в). Число твердости определяют так же, как и в способе Бринеля, отношением нагрузки к площади боковой поверхности отпечатка.

При испытании измеряют обе диагонали отпечатка  $d_1$  и  $d_2$  с точностью до 0.001 мм при помощи микроскопа, который является составной частью прибора Виккерса. Для определения числа твердости по специальным таблицам высчитывают среднеарифметическую величину обеих диагоналей.

Достоинство метода Виккерса — возможность измерения твердости мягких, а также особо твердых материалов. Этим методом можно измерять твердость очень тонких изделий, а также твердость поверхностных слоев, например, при обезуглероживании, поверхностном наклепе, цементации и т. д. Вследствие большого угла в вершине наконечника пирамиды даже при малой глубине ее внедрения, диагональ отпечатка имеет большую величину, что определяет высокую точность и чувствительность этого метода.

*Метод микротвердости* предназначен для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплавов (например, зерен феррита в стали), очень тонких поверхностных слоев (сотые доли миллиметра). По существу метод микротвердости не отличается от метода Виккерса. Различие состоит лишь в том, что наконечник — четырехгранная пирамида — имеет меньшие размеры и нагрузки при ее вдавливании составляют от 0.05 Н (5 гс) до 5 Н (500 гс).

### 3.4. Вязкость.

*Вязкость* выражает способность материала поглощать работу внешних сил за счет пластической деформации. Для оценки вязкости материалов и установления их склонности к переходу из вязкого в хрупкое состояние наиболее часто проводят ударные испытания на маятниковом копре (рис. 3, а). Для получения сопоставимых результатов испытания проводят на стандартных образцах с надрезами определенной формы и размеров (см. рис. 3, б).

Образец устанавливают на опорах копра надрезом в сторону, противоположную удару ножа маятника, который поднимают на определенную высоту.

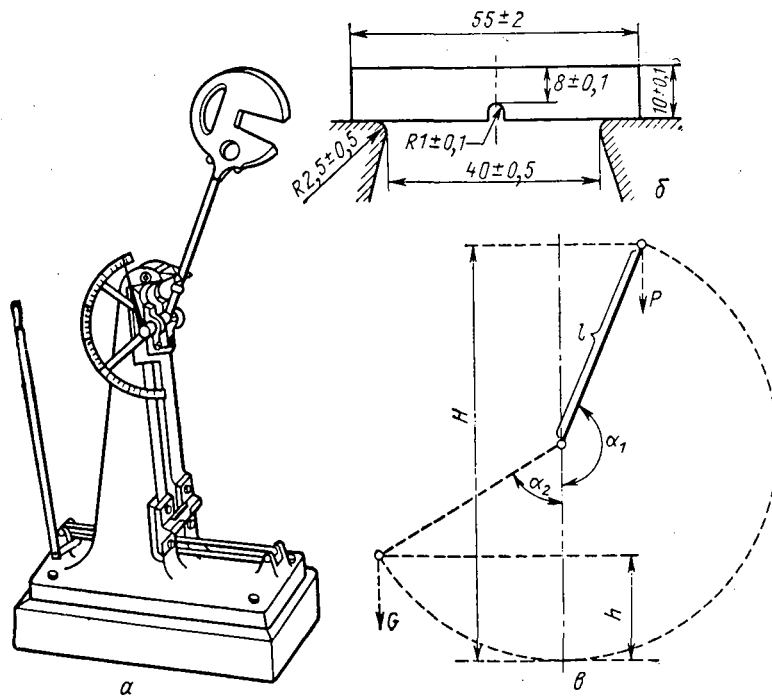


Рис. 56. Маятниковый копер (а), образец для испытания (б) и схема для определения работы по разрушению надрезанного образца (в)

Рис.3

Ударная вязкость  $KС$ , Дж/см<sup>2</sup>, определяется как отношение работы разрушения  $K$ , затраченной на деформацию и разрушение ударным изгибом надрезанного образца, к площади поперечного сечения образца в месте надреза  $S_0$  по формуле  $KС = K/S_0$ .

В зависимости от вида концентратора напряжений различают образцы трех типов: с радиусом дна надреза 1.0 мм (тип U); 0.25 мм (тип V) и инициированной трещиной (тип T) (рис. 4).

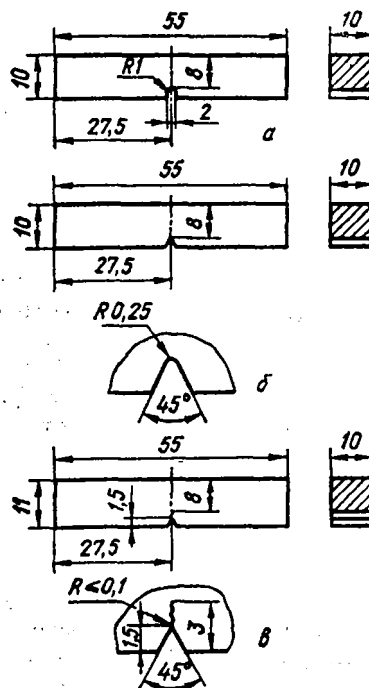


Рис.4

Работу удара обозначают двумя буквами KU, KV, KT, а ударную вязкость - тремя буквами KCU, KCV, KCT. В этих обозначениях последние буквы являются символами концентраторов напряжений.

### 3.5. Длительные испытания.

*Усталостью* называется разрушение металлов под действием повторных или знакопеременных нагрузок. Усталостное разрушение наблюдается, например, у пружин автоматики деталей кулачковых и других механизмов, работающих в режиме нагружение-разгружение, растяжение-сжатие, и др., при многократном повторении ударных или плавно возрастающих нагрузок (напряжений). Например, у валов, передающих крутящий момент, материал которых испытывает изгиб с вращением, происходит многократное изменение знака напряжений (растяжение-сжатие).

Характерная особенность усталостного разрушения состоит в том, что оно происходит без заметных внешних признаков пластической деформации. В усталостном изломе, как правило, наблюдаются две характерные зоны. Первая зона, имеющая гладкую поверхность, образуется в результате возникновения и постепенного развития усталостной трещины, вторая зона — зона окончательного излома, оставшейся части сечения изделия.

Образование усталостной трещины связано с реальным строением металлов — наличием различно ориентированных, зерен и блоков, неметаллических включений, микропор, дислокаций и других дефектов кристаллической решетки. В этих условиях при расчетной средней величине напряжений, не превышающей значения предела упругости, фактические напряжения в металле распределяются неравномерно.

В отдельных перенапряженных зернах (блоках) происходит пластическая деформация и в результате ее предельного развития возникает субмикротрещина. Трещины являются сильными концентраторами напряжений и из них образуются микротрещины, далее соединяющиеся в общую усталостную макротрещину, постепенно распространяющуюся на сечение. Разрушение происходит в результате возрастания напряжения в оставшейся зоне сечения.

Характеристикой сопротивления усталости является *предел выносливости* — наибольшее напряжение цикла, которое выдерживает материал без разрушения при заданном числе циклов нагружения ( $N$ ). Для стали предел выносливости обычно определяют на базе  $N = 10^7$ , для цветных металлов  $N = 10^8$  циклов нагружения. Наиболее часто предел выносливости определяют при испытании образца на изгиб с вращением со знакопеременным симметричным циклом напряжений (рис. 5, а).

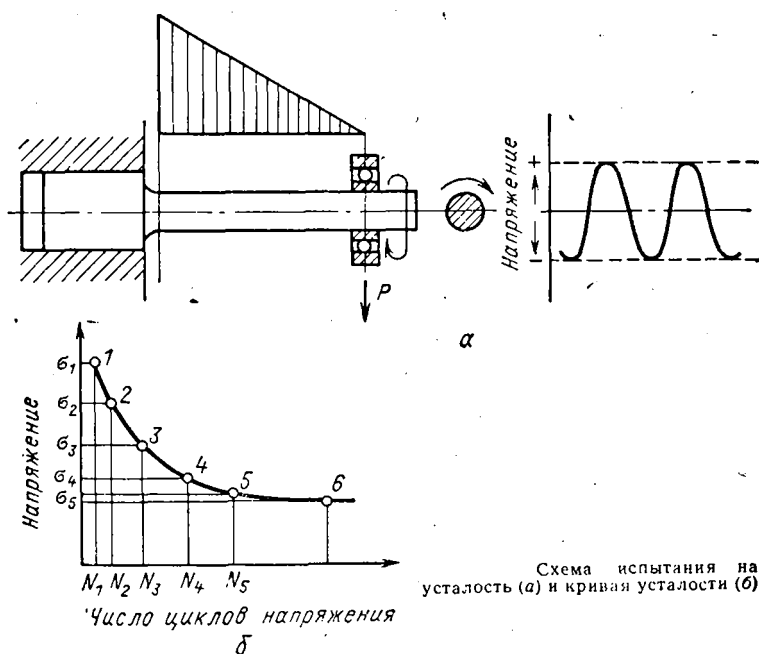


Рис.5

Испытание проводят на серии образцов при различной нагрузке с определением разрушающего напряжения цикла и соответствующего ему числа циклов нагружения. По полученным данным строят кривую, на которой определяют пределы выносливости, на базе заданного числа циклов нагружения (рис. 57, б). Предел выносливости, определяемый в стандартных условиях, например, для стали при  $N = 10^7$ , обозначают  $\sigma_{-1}$ .

При определении ограниченной усталостной прочности в обозначении указывают базу испытания, например  $\sigma_{N=10^5}$ . Теоретическому пределу выносливости соответствует напряжение, которое без разрушения выдерживает материал при бесконечно большом числе циклов нагружения.