

1.3. Механические испытания материалов

1.3.1. Испытания на растяжение

Испытания на одноосное растяжение – наиболее распространенный 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 расчетов.

Методы испытания на растяжение стандартизованы. Имеются отдельные стандарты на испытания при комнатной температуре (ГОСТ 1497-73), при повышенных до 1200°C (ГОСТ 9651-73) и пониженных от 0°C до ...-100°C (ГОСТ 11150-75) температурах. В них сформулированы определения характеристик, оцениваемых при испытании, даны типовые формы и размеры образцов, основные требования к испытательному оборудованию, методика проведения испытания и подсчета результатов.

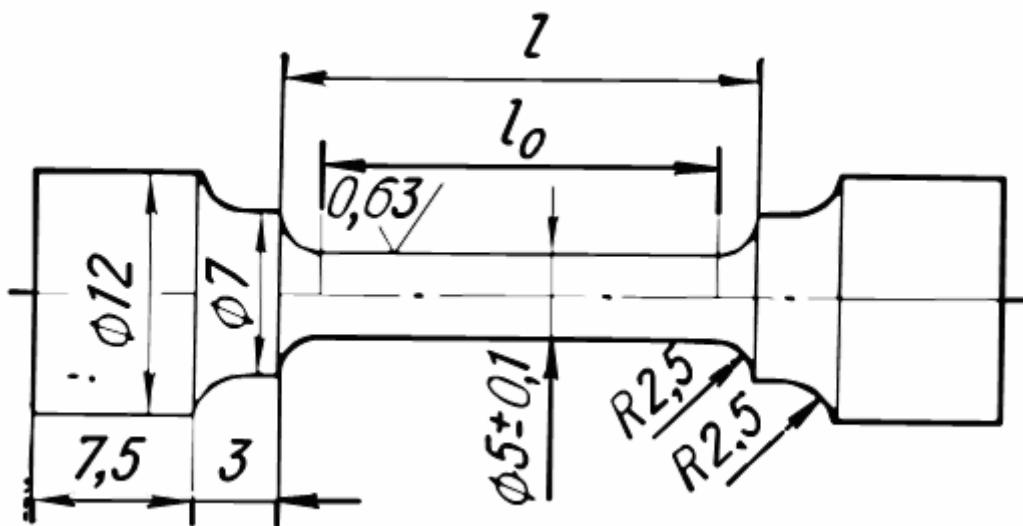


Рис. 1.16. Стандартный цилиндрический образец для испытаний на растяжение

Для испытаний на растяжение используют образцы с рабочей частью в виде цилиндра (такой образец в качестве примера показан на рис. 1.16) или стержня с прямоугольным сечением (плоские образцы).

Помимо основной рабочей части большинство образцов имеет головки различной конфигурации для крепления в захватах. Основные размеры образца:

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

Между размерами образца должны существовать определенные соотношения. Все требования по форме, размерам и качеству образцов для испытаний на растяжение базируются на общих соображениях и правилах, которые основаны на условиях подобия механических испытаний (результаты, полученные на разных образцах и в разных лабораториях, можно сравнивать между собой).

Абсолютные размеры образцов могут меняться в широких пределах. В частности, диаметр рабочей части пропорциональных цилиндрических образцов $d_0=3\text{--}25$ мм, у плоских размеры поперечного сечения a_0 и b_0 могут составлять $0,5\text{--}2$ мм. Для испытаний при комнатной температуре чаще всего используют так называемые «гагаринские» цилиндрические короткие образцы с $d_0=6$ и $\ell_0=30$ мм.

В некоторых случаях, например при работе с малогабаритными изделиями или дефицитными материалами, используют «микрообразцы» с $d_0 \leq 1\text{--}2$ мм и $\ell_0 = 4\text{--}7$ мм.

Машины для испытаний на растяжение очень разнообразны. Многие из них универсальны и могут использоваться при проведении нескольких видов испытаний. Современные испытательные машины высшего класса

представляют собой сложные, частично автоматизированные устройства; они все чаще оснащаются компьютером, при помощи которого может проводиться расчет любых характеристик в процессе испытания.

По принципу действия приводного устройства различают машины с *механическим и гидравлическим приводами*.

В машинах с механическим приводом от электродвигателя (рис. 1.17,*a*) подвижный захват 3 связан с грузовым винтом 5, находящимся в зацеплении с гайкой 4. Движение от электродвигателя через редуктор передается гайке. Вращаясь, она перемещает винт с захватом, растягивая испытываемый образец 2. Машины с механическим приводом обычно имеют небольшую мощность; они рассчитаны на разрушающие усилия не более 0,1 – 0,15 МН.

Гидравлический привод используется в машинах большей мощности, рассчитанных на нагрузки до 1 МН и выше. В этих машинах (см. рис. 1.17,*б*) подвижный захват 3 связан с поршнем 4, который перемещается в рабочем цилиндре 5 под давлением жидкости (обычно масла), создаваемым насосом. На машинах с гидравлическим приводом труднее поддерживать заданную скорость деформирования образца, чем при использовании механического привода.

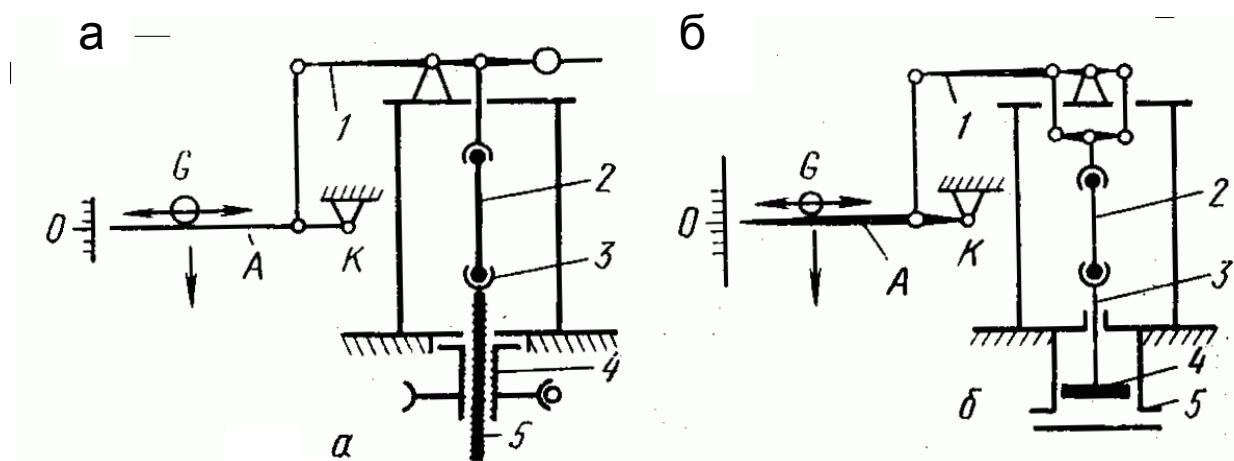


Рис. 1.17. Схема испытательной машины:
а – с механическим приводом; *б* – с гидравлическим приводом

При проведении испытаний все размеры образца определяют с точностью не ниже 0,1 мм. Каждый размер следует измерять несколько раз. Например, замер диаметра проводят в середине и по краям рабочей части

образца с последующим определением среднего значения, по которому рассчитывают площадь его поперечного сечения. Величина нагрузки должна определяться с точностью до 0,5 наименьшего деления индикатора силоизмерительного механизма.

1.3.2. Практическая работа. Расчет характеристик прочности и пластичности при испытаниях на растяжение

Первичная кривая растяжения, полученная непосредственно при испытаниях, строится в координатах нагрузка Р (МН) – удлинение образца $\Delta\ell$, после обработки результатов ее строят в координатах напряжение σ – деформация ε . Напряжение определяется как $\sigma = P / F_0$ (МПа), где F_0 – площадь поперечного сечения образца. Деформация (в данном случае относительное удлинение) $\varepsilon = \Delta\ell / \ell_0$ (%). Относительное удлинение обозначается ε в ходе испытаний, после разрушения образца величина $\Delta\ell / \ell_0$ обозначается как δ (%). Непосредственно на образце измеряют величину

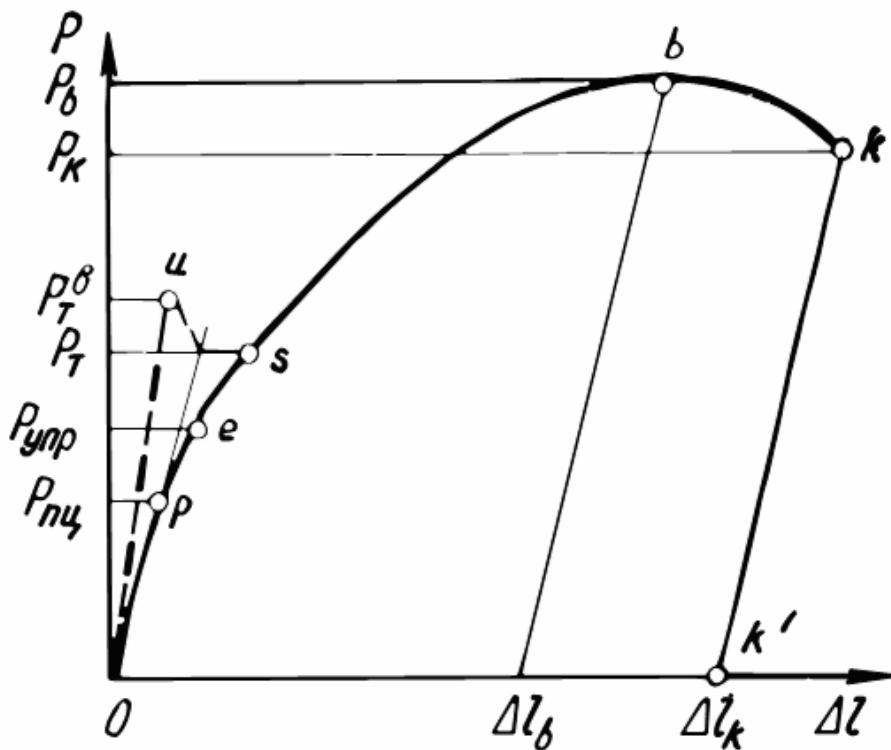


Рис. 1.18. Характерные точки на первичной диаграмме растяжения (в координатах нагрузка Р – удлинение образца $\Delta\ell$), по которым рассчитываются прочностные характеристики

относительного сужения $\psi = \Delta F / F_0$ (%) в месте разрушения образца. Величины δ и ψ характеризуют пластичность образца.

Прочностные характеристики. На кривой растяжения (рис. 1.18) выделяются ряд характерных точек:

Предел пропорциональности $P_{пц}$ – напряжение, которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука. При достаточно большом масштабе записи диаграммы (не менее 1:20) растяжения эту точку определяют следующим образом:

- продолжают линейный участок до пересечения с осью деформаций (точка О) и получают начало координат, исключая искаженный из-за недостаточной жесткости испытательной машины участок диаграммы;

- на произвольной высоте в пределах упругой области проводят перпендикуляр АВ к оси нагрузок (рис. 1.19), откладывают вдоль него отрезок $BC=1/2 AB$ и проводят линию ОС. Если теперь провести касательную к кривой растяжения параллельно ОС, то точка касания р определит искомую нагрузку $P_{пц}$.

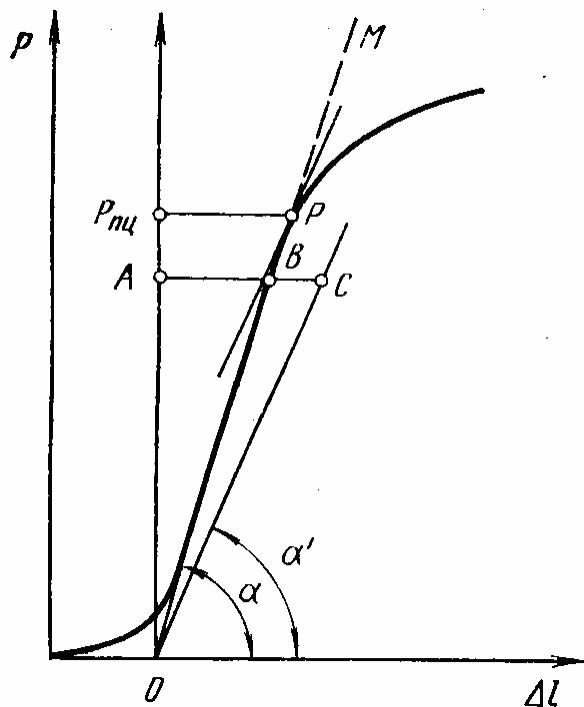


Рис. 1.19. Графический способ определения предела пропорциональности

Более точное определение предела пропорциональности возможно при использовании специальных приборов – тензометров для измерения малых деформаций.

Предел упругости. Следующая характерная точка на первичной диаграмме растяжения (см. рис. 1.18) – точка e . Ей отвечает нагрузка, по которой рассчитывают условный предел упругости – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно 0,05%, иногда меньше – вплоть до 0,005%. Использованный при расчете допуск указывается в обозначении условного предела упругости: $\sigma_{0,005}$, $\sigma_{0,05}$ и т. д.

Предел упругости характеризует напряжение, при котором появляются первые признаки пластической деформации образца.

Для определения $\sigma_{0,05}$ от начала координат откладывают отрезок $OK=0,05 \cdot l_0 / 100$ и через точку K проводят прямую, параллельную прямолинейному участку диаграммы (рис. 1.20). Ордината точки e будет

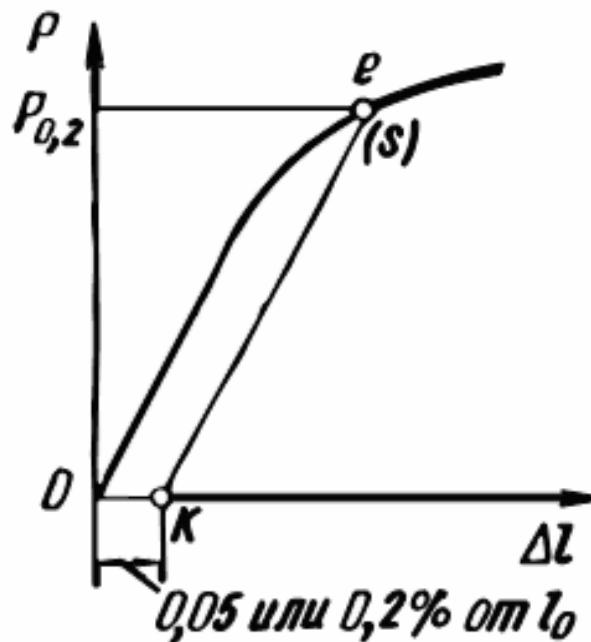


Рис. 1.20. Определение условного предела упругости (или текучести) по диаграмме растяжения

соответствовать величине нагрузки $P_{0,05}$, определяющей условный предел упругости: $\sigma_{0,05} = P_{0,05} / F_0$. Если значение предела упругости предполагается проводить графически, то запись диаграммы должна проводиться в масштабе не менее 1:50.

Условный предел текучести — напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно 0,2 %. Соответственно условный предел текучести обозначается $\sigma_{0,2}$. Как видно, эта характеристика отличается от условного предела упругости только величиной допуска на остаточную деформацию. Предел текучести характеризует напряжение, при котором происходит более полный переход к пластической деформации. Методика здесь полностью аналогична применяемой для определения $\sigma_{0,05}$. Поскольку допуск по удлинению для расчета условного предела текучести относительно велик, его часто определяют графически по диаграмме растяжения, если последняя записана в масштабе 1:20. Тогда $\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0$.

Техническое значение пределов $\sigma_{0,005}$ и $\sigma_{0,2}$ сводится к оценке уровня напряжений, под действием которых та или иная деталь может работать, не подвергаясь остаточной деформации. Физически — это граница между упругим участком, в пределах которого под действием внешнего напряжения движутся дислокации, находившиеся в образце в его исходном состоянии, и между областью пластической деформации, в которой начинают работать источники новых дислокаций и плотность дислокаций в образце резко возрастает.

Плавный переход от упругой к пластической деформации (без зуба и площадки текучести) наблюдается при растяжении таких металлов и сплавов, в которых имеется достаточно большое количество подвижных, незакрепленных дислокаций в исходном состоянии (до начала испытания). Напряжение, необходимое для начала пластической деформации поликристаллов этих материалов, оцениваемое через условный предел текучести, определяется силами сопротивления движению дислокаций внутри зерен, легкостью передачи деформации через их границы и размером зерен.

Явление резкой текучести (так называемый зуб текучести и площадка текучести) наблюдается у многих технически важных металлических материалов и связано с различными механизмами закрепления дислокаций, имеющихся в материале перед его деформацией, например при эффективной

блокировке дислокаций примесями (атмосферы Котрелла). Тогда для начала движения дислокаций требуется приложить напряжение большее, чем это требуется для перемещения дислокаций, свободных от примесных атмосфер.

Временное сопротивление σ_b . После прохождения точки s на диаграмме растяжения (см. рис. 1.13) в образце развивается интенсивная пластическая деформация. До точки b рабочая часть образца подвергается равномерному удлинению. В точке b в какой-то части образца, обычно вблизи концентратора напряжений, который был уже 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. Временное сопротивление определяется как $\sigma_b = P_b/F_0$.

Возможность значительной равномерной деформации и «оттягивание» момента начала образования шейки в пластичных материалах обусловлены деформационным упрочнением. Если бы его не было, то шейка начала бы формироваться сразу же по достижении предела текучести.

Возможность значительной равномерной деформации и «оттягивание» момента начала образования шейки в пластичных материалах обусловлены деформационным упрочнением. Если бы его не было, то шейка начала бы формироваться сразу же по достижении предела текучести.

1.3.3. Динамические испытания на изгиб образцов с надрезом

При эксплуатации различные детали и конструкции часто подвергаются ударным нагрузкам. В качестве примера можно привести переход автомобиля через выбоину на дороге, взлет и посадку самолетов, высокоскоростную обработку металла давлением (при ковке и штамповке) и др. Для оценки способности металлических материалов переносить ударные нагрузки используют динамические испытания, которые широко применяются также для выявления склонности металлов к хрупкому разрушению. Наиболее распространены ударные испытания на изгиб

образцов с надрезом. Помимо них используются методы динамического растяжения, сжатия и кручения.

Скорости деформации при динамических испытаниях (10^2 с^{-1}) на несколько порядков больше, чем при статических ($10^{-4} - 10^{-1} \text{ с}^{-1}$).

При динамических испытаниях закон подобия не действует. Поэтому здесь необходима жесткая унификация размеров образцов и условий

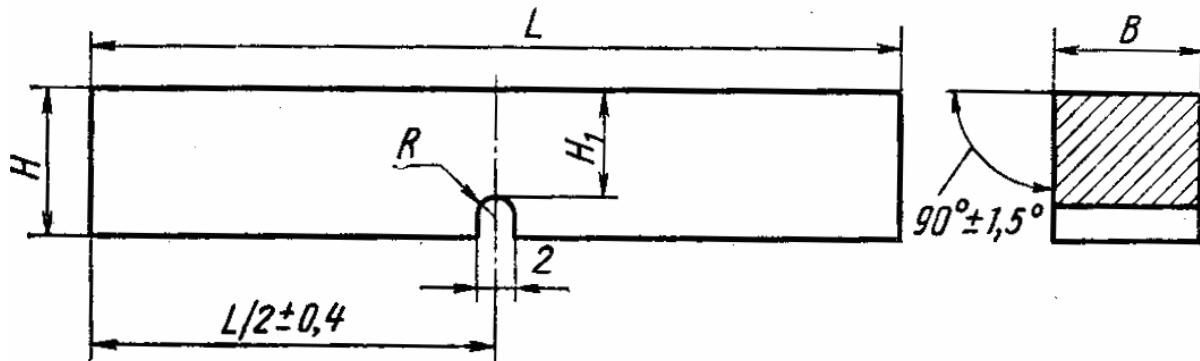


Рис. 1.21. Образец с U-образным надрезом для испытаний на ударный изгиб ГОСТ 9484 – 78 (образец Шарпи)

проведения испытания. Основным образцом по ГОСТ 9454 – 78 служит стержень с квадратным сечением 10x10 мм и длиной 55 мм (рис. 1.21).

Если такой образец не разрушается при испытаниях, то на него в центральной части наносят надрез. В образцах Шарпи U-образный надрез наносится посередине длины (см. рис. 1.21). Он имеет ширину и глубину 2 и радиус закругления 1 мм. Образцы с V-образным концентратором имеют те же габариты и отличаются только геометрией надреза. Третий тип образцов, предусмотренный ГОСТ 9454-78, имеет Т-образный концентратор напряжений (надрез с усталостной трещиной). Длина L этих образцов тоже 55 мм, а высота сечения $H=11$ мм при $B=10$; 7,5 или 5 мм. Допускается применение образцов с $B=2$ мм и $H=9$ мм, $B=H=10$ мм и $B=H=25$ мм. В последнем случае $L=140$ мм.

Образцы с V-образным концентратором (образцы Менаже) используются при контроле металлических материалов для ответственных конструкций (летательных аппаратов, транспортных средств и т.д.). Образцы Шарпи с U-образным надрезом рекомендуется применять при выборе и

приемочном контроле металлов и сплавов до установления норм на образцы с V-образным концентратором. Образцы с трещиной предназначены для испытания материалов, работающих в особо ответственных конструкциях, где сопротивление развитию трещины имеет первостепенное значение.

Испытания на ударный изгиб проводят на маятниковых копрах с предельной энергией, не превышающей 300 Дж. При испытании образцов с $L=55$ мм расстояние между опорами должно быть 40 мм. Изгибающий нож имеет сечение в виде треугольника с углом при вершине 30° и радиусом закругления 2 мм. Схема испытания приведена на рис. 1.22.

Образец кладут горизонтально в специальный шаблон, обеспечивающий установку надреза строго в середине пролета между опорами. Удар наносят со стороны, противоположной надрезу, в плоскости, перпендикулярной продольной оси образца.

Маятник копра закрепляется в исходном верхнем положении. По шкале

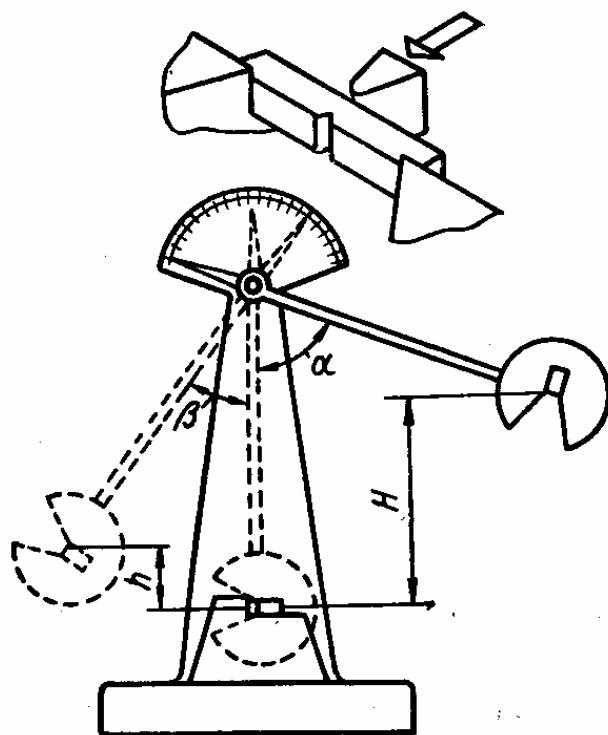


Рис. 1.22. Схема ударного испытания на маятниковом копре

фиксируется угол подъема маятника α . Затем крепящую защелку вынимают, маятник свободно падает под собственной тяжестью, ударяет по образцу, изгибает и разрушает его, поднимаясь относительно вертикальной оси копра

на угол β . Этот угол тем меньше, чем большая работа K затрачена маятником на деформацию и разрушение образца. Скорость копра v_k (м/с) в момент удара по образцу зависит от высоты подъема H (см. рис. 1.22): $v_k = (2gH)^{1/2}$, где g – ускорение свободного падения.

Величина работы деформации и разрушения определяется разностью потенциальных энергий маятника в начальный (после подъема на угол α) и конечный (после взлета на угол β) моменты испытания: $K=P(H-h)$, где P – масса маятника; H и h – высоты подъема и взлета маятника (см. рис. 1.22). Если длина маятника L , то $h=L(1-\cos \beta)$, $H=L(1-\cos \alpha)$ и, следовательно, $K=PL(\cos \beta - \cos \alpha)$. Эта формула служит для расчета работы K по измеренным углам α и β (P и L постоянны для данного копра). Шкала копра может быть проградуирована в единицах работы, если угол подъема маятника α фиксирован.

Часть энергии удара затрачивается на преодоление сопротивления воздуха, на трение в подшипниках и в измерительном устройстве, на смятие образца на опорах и под ножом, на сообщение энергии обломкам образца и на упругую деформацию штанги маятника.

На копрах, применяемых при обычных испытаниях металлов, большинство этих потерь не поддается учету, в результате получаемые значения K оказываются завышенными на несколько процентов. Особенно велики потери энергии при несовпадении оси удара и середины надреза на образце. Поэтому величины ударной вязкости, определенные на различных копрах, могут отличаться друг от друга на 10 – 30 %. Точность определения работы излома тем выше, чем меньше превышение запаса работы маятника над работой деформации и разрушения образца; нужно стремиться, чтобы угол β после разрушения образца был небольшим.

Зная полную работу деформации и разрушения K , можно рассчитать основную характеристику, получаемую в результате рассматриваемых испытаний – **ударную вязкость** K_C : $K_C = K/F_0$, где F_0 – площадь

поперечного сечения образца в месте надреза до испытания. Ударную вязкость часто обозначают как a (размерность Дж/м² или Дж/см²).

В зависимости от вида концентратора в образце в обозначение ударной вязкости вводится третий индекс (U, V или T). Например, KCV — ударная вязкость, определенная на образце с V-образным концентратором при комнатной температуре.

Динамические испытания на изгиб надрезанных образцов являются самыми жесткими среди стандартных испытаний.

Ударные испытания, как и статические, можно проводить при отрицательных и повышенных температурах. Для обозначения ударной вязкости при пониженной или повышенной температурах используется цифровой индекс, соответствующий температуре испытания. Например, KCT^{60} — ударная вязкость, определенная на образце с Т-образным концентратором при - 60°C.

В массовых динамических испытаниях на изгиб образцов с надрезом ударная вязкость — единственная выходная характеристика испытания. Диаграмма деформации обычно не записывается, так как это сопряжено со значительными экспериментальными трудностями. Общее время испытания измеряется долями секунды, поэтому для фиксации зависимости нагрузки от деформации требуются малоинерционные чувствительные датчики и быстродействующий прибор для записи диаграмм.

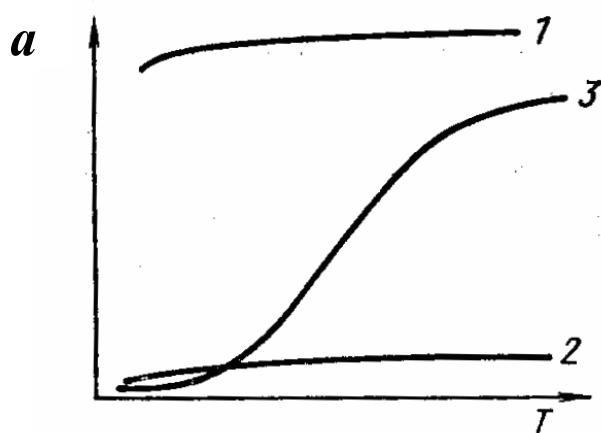


Рис. 1.23. Различные варианты температурной зависимости ударной вязкости a : 1 – вязкие материалы; 2 – хрупкие материалы; 3 – кривая хрупковязкого перехода

Одной из важнейших задач ударных испытаний является оценка склонности к хрупкому, разрушению. Эта задача решается построением температурной зависимости ударной вязкости и определением температуры хрупко-вязкого перехода. Возможны три типа кривых ударная вязкость – температура (рис. 1.23). Кривая 1 характерна для вязких даже при отрицательных температурах материалов, например металлов (медь, алюминий) и сплавов с ГЦК-решеткой (аустенитные стали). Кривая 2 получается при испытании хрупких в широком диапазоне температур материалов, например закаленных на мартенсит сталей. Наконец, кривая 3 характеризуется температурным интервалом хрупковязкого перехода, по ней можно оценить T_{xp} . Такой тип кривых $KC(T)$ типичен для металлов с ОЦК- и ГПУ-решетками, многих сталей с ферритно-перлитной структурой. Зная T_{xp} и рабочую температуру T_p испытуемого материала, можно оценить его температурный запас вязкости: $\chi = (T_p - T_{xp}) / T_p$. Чем больше χ , тем меньше опасность хрупкого разрушения.

1.3.4. Измерение твердости

Под твердостью понимают способности поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора). Существуют различные методы измерения твердости.

Ниже в практической работе 1.3.6 использованы данные измерения твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999-75). В этом случае в поверхность образца вдавливают алмазный индентор в форме четырехгранной пирамиды с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. После удаления нагрузки P (в зависимости от условий опыта может меняться от 10 до 1000 Н, длительность воздействия 10-15 с) измеряют диагональ отпечатка d , оставшегося на поверхности. Число твердости HV определяют делением нагрузки на площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка: $HV = (2 P \sin \alpha/2) d^2$.