**ОПЫТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

**Назначение и виды испытаний.**

Для того чтобы ответить на вопрос о работоспособности рассчитываемого элемента конструкции, необходимо знать как максимальные значения напряжений или деформаций, так и механические характеристики материала из которого изготовлен элемент конструкции.

Механические характеристики материалов, т.е. величины, характеризующие их прочность, пластичность, упругость и упругие постоянные, необходимые для выбора материала и расчетов проектируемых деталей, определяют путем механических испытаний стандартных образцов под нагрузкой, изготовленных из исследуемых материалов.

***Механические испытания*** *– экспериментальное исследование механических свойств материалов на специальных образцах, форма и размеры которых устанавливаются стандартами.*

Следует различать механические испытания материалов и конструкций. При испытании материала определяют свойства материала, а при испытании конструкции – правильность проведенных расчетов, технологических процессов изготовления, сборки, установки и др.

Для изучения механических свойств материалов и установления значения предельных напряжений (по разрушению или по пластическим деформациям) производят испытания образцы материала вплоть до разрушения.

Испытания проводят при нагрузках следующих категорий: статической, ударной и циклической.

По виду деформации, испытываемой образцом, различают испытания на растяжение, сжатие, кручение, изгиб.

Так как результаты испытаний зависят от формы образца, скорости его деформирования, температуры при испытании и т.д., то эксперимент ведут при условиях, предусмотренными ГОСТами.

Испытания проводят на специальных машинах, разнообразных по конструкции и мощности.

Для измерения деформаций применяют специальные приборы (тензометры), имеющие высокую чувствительность.

**Механические характеристики материалов при растяжении**

Наиболее распространенным является испытание на растяжение цилиндрического образца статической нагрузкой. Опыт на растяжение прост методически и требует сравнительно несложного оборудования. Но основное его достоинство – возможность исследования однородного напряженного состояния (когда поведение материала во всех точках одинаково). Только при таком напряженном состоянии можно установить необходимые механические характеристики, не прибегая к упрощающим гипотезам.

Испытания проводят на длинных стандартных образцах круглого или прямоугольного сечения. Цилиндрические образцы (рис. 3.1) имеют диаметр более 3 мм и длину испытуемой части . При испытаниях чаще используют цилиндрические образцы диаметром 10 мм.

*l*0

*lрабочая*

*d*0

Рис. 3.1. Вид цилиндрического образца для испытаний на растяжение

Результаты испытаний наиболее наглядно проявляются на графике зависимости между нагрузкой *F*, растягивающей образец, и соответствующим удлинением Δ*l*. Такой график называется *диаграммой растяжения*. Для того чтобы исключить влияние абсолютных размеров образца и судить о механических свойствах непосредственно материала, диаграмму перестраивают в другом масштабе: все ординаты делят на начальную площадь поперечного сечения *A*0, а все абсциссы – на первоначальную расчетную длину Δ*l*0. В результате получается график зависимости между нормальным напряжением  и относительной деформацией . Эту диаграмму называют условной диаграммой растяжения, т.к. напряжения и относительные удлинения вычисляют по отношению к первоначальной площади сечения и первоначальной длине образца.

**Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали.**

На рис. 3.2, а представлена диаграмма растяжения малоуглеродистой стали, которую относят к числу пластичных материалов. Под графиком, в соответствии с его очертанием, иллюстрируются характерные стадии деформирования образца от начала нагружения до разрыва (рис. 3.2, б).

*O*

*A*

*σпц*

*B*

*C*

*D*

*E*

*K*

*σу*

*σт*

*σпч, σв, σmax*

*L*

*M*

*εу*

*εу*

*εпл*

*εп*

**

**

*l0*

*lк*

*а*

*б*

Рис. 3.2. Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали (а) и стадии

деформирования образца (б)

На диаграмме различают следующие характерные участки и точки.В *начальной стадии нагружения*, на участке *OA*, зависимость носит линейный характер, что подтверждает справедливость закона Гука. Наибольшее напряжение, до которого соблюдается этот закон (точка *A* на диаграмме), называется *пределом пропорциональности* .

Из рисунка видно, что , т.е. модуль упругости *E* графически представляет собой тангенс угла наклона прямолинейного участка диаграммы к оси абсцисс. Если до достижения точки *A* сбросить нагрузку до нуля, то график разгрузки совпадает с графиком нагружения. Это говорит о том, что при напряжениях  возникают только *упругие деформации*.

Однако граница области упругой работы материала лежит несколько выше точки *A*. Там, где деформации растут уже быстрее напряжений, закон Гука нарушается, и диаграмма начинает искривляться. Напряжение, соответствующее наибольшей деформации, которая полностью исчезает после разгрузки (точка *B* на диаграмме), называется *пределом упругости* . Точки *A* и *B* лежат настолько близко друг к другу, что на практике их полагают совпадающими, считая .

Начиная с точки *B*, появляются пластические (остаточные) деформации. После точки *B* продолжается дальнейшее искривление диаграммы и в *C* она переходит в практически горизонтальный участок – *площадку текучести*. Образец удлиняется при фактически постоянной нагрузке, течет, т.е. элемент конструкции (образец) необратимо изменяет форму. Напряжение, при котором происходит рост деформации без увеличения нагрузки, называется *пределом текучести* . Он легко поддается определению и является одной из основных механических характеристик материала.

Ряд материалов дает диаграмму деформирования без ярко выраженной площадки текучести. Для них устанавливают *условный предел текучести* σ0,2, равный напряжению, при котором относительная остаточная деформация образца равна 0,2%.

Текучесть малоуглеродистой стали сопровождается значительными сдвигами кристаллов, поверхность образца становится матовой в результате появления полос (рис. 3.3), наклоненных к оси образца под углом в 45° (линии Людерса-Чернова).

После окончания стадии текучести материал снова начинает сопротивляться деформированию (упрочняется) и диаграмма за точкой *D* поднимается вверх, но более полого.



*Линии Чернова*

*45°*

Рис. 3.3 Линии Людерса-Чернова

Если нагрузить образец до напряжения выше предела пропорциональности, например до точки *L*, то разгрузка пойдет по прямой *LM*, параллельной *OA*. Упругая часть деформации εу исчезнет, пластическая часть – εпл – останется. Таким образом, силовую деформацию в образце можно представить в виде суммы упругой и пластической составляющих

. 3.1

Если материал нагружать повторно, то диаграмма пойдет по прямой *ML* до точки *L*. Необходимо отметить, что диаграмма *MLEK*, получаемая при повторном нагружении, не имеет площадки текучести, а предел пропорциональности (напряжение в точке *L*) выше первоначального предела пропорциональности (напряжение в точке *A*).

*Явление повышения пропорциональности и снижения пластичности материала при повторном нагружении называют* ***наклепом****.*

В ряде случаев наклеп полезен и его создают искусственно, например, в деталях, работающих при циклических нагрузках или в толстостенных сосудах.

В процессе испытания на растяжение продольное удлинение сопровождается поперечным сужением. Обе эти деформации распределяются по расчетной длине образца равномерно (рис. 3.2, б). С течением времени на наиболее слабом участке (обычно это середина образца) образуется резкое местное сужение – шейка. Соответствующее напряжение (наивысшая точка диаграммы *E)* называется *пределом прочности* σпч или *временным сопротивлением* σв, что соответствует наибольшему условному напряжению. Предел прочности является условной характеристикой, которая численно равна отношению наибольшей нагрузки, которую выдержал образец к первоначальной площади сечения.

Площадь сечения образца в шейке быстро уменьшается и, как следствие, падает усилие и условное напряжение. На условной диаграмме напряжение в момент разрыва (в точке *K*) меньше напряжения в точке *E*. Разрыв образца происходит по наименьшему сечению шейки (рис. 3.4).

*d0*

*dк*

Рис. 3.4. Образование шейки в образце из пластичного материала

Иногда, для более подробного изучения значительных пластических деформаций строят истинную диаграмму растяжения с учетом уменьшения площади поперечного сечения, которая идет выше условной диаграммы (на диаграмме не показано).

Важной характеристикой *пластичности* материала является *относительное остаточное удлинение* при разрыве

, 3.2

где *l*К – расчетная длина образца после разрыва.

Второй характеристикой пластичности является *относительное остаточное сужение* при разрыве

, 3.3

где *A*К – площадь наименьшего поперечного сечения шейки при разрыве.

Характеристики δ и ψ являются мерой пластичности материала и показывают способность материала приобретать остаточные пластические деформации. Чем больше δ и ψ, тем пластичнее материал.

*Показатели пластичности материала δ и ψ нельзя путать с величинами деформативности ε|| (продольная деформация) и  (поперечная деформация).*

К числу очень пластичных материалов относятся медь, алюминий, латунь, малоуглеродистая сталь и др. Менее пластичными являются дюраль и бронза, а слабопластичными – большинство легированных сталей.

***Подводя итоги****, можно сделать вывод: характеристикой упругих свойств материалов является предел упругости, характеристикой прочности – предел текучести и предел прочности, характеристиками пластичности – относительное остаточное удлинение и относительное остаточное сужение при разрыве.*

Противоположным свойству пластичности является *хрупкость*.

Материалы, обладающие очень малой пластичностью, называются *хрупкими*. Для таких материалов величина остаточного удлинения при разрыве не превышает 2–5%, в ряде случаев измеряется долями процента. К хрупким материалам относятся чугун, высокоуглеродистая инструментальная сталь, камень, керамика, бетон, стекло, др.

***Хрупкость*** *– способность материала разрушаться при назначительных остаточных деформациях.*

*Деление материалов на пластичные и хрупкие является условным.*

**Диаграмма растяжения хрупких материалов.**

При растяжении хрупких материалов наблюдается ряд особенностей. Характерная диаграмма растяжения (на примере чугуна) показана на рис. 3.5.

*O*

*σпч, σв, σmax*

*εп*

**

**

Рис. 3.5. Диаграмма растяжения чугуна

На диаграмме растяжения отклонение от закона Гука наступает уже в начальной стадии нагружения, разрыв наступает при малых деформациях. Хрупкие материалы плохо сопротивляются растяжению.

Опасность хрупкого разрушения заключается в том, что оно происходит быстро, почти внезапно, без образования шейки. Поэтому на диаграмме растяжения отсутствует площадка текучести. При испытаниях на растяжение хрупких материалов определяют, как правило, только предел прочности

*Чем выше прочностные характеристики материала, тем прочнее материал. В практических расчетах и в справочной литературе для* ***пластичных*** *материалов чаще используют* ***предел текучести*** * , а для* ***хрупких материалов*** *–* ***предел прочности*** *.*

**Диаграммы деформирования при сжатии.**

Испытание на сжатие *пластичных* материалов менее распространено, чем испытание на растяжение. В упругой области и при малом развитии пластических деформаций диаграмма сжатия таких материалов почти полностью повторяет диаграмму растяжения и не дает никаких новых механических характеристик (рис. 3.6, а). Пределы пропорциональности, упругости и текучести имеют те же значения. Углы наклона прямолинейных участков на обеих диаграммах одинаковы, следовательно, одинаковы и модули упругости.



*σ*

*ε*



*F*

*F*

*б*

*растяжение*

*сжатие*

*100% εсж*

*a*

Рис. 3.6. Диаграммы деформирования пластичного материла при сжатии и растяжении (а), стадии деформирования образца при сжатии (б)

Различия начинаются после наступления текучести. Площадка текучести при сжатии менее ярко выражена, чем в случае растяжения. При больших деформациях сжатие сопровождается увеличением площади поперечного сечения образца, вследствие чего испытание требует постоянно возрастающей нагрузки. Следовательно, при сжатии пластичного материала получить характеристику предела прочности невозможно.

Исследуемый образец сначала приобретает бочкообразную форму, а затем, не разрушаясь, расплющивается (рис. 3.6, б), и дальнейшие испытания ограничиваются возможностями испытательного оборудования. В расчетной практике предел прочности на сжатие условно принимают равным пределу прочности при растяжении.

**Диаграмма сжатия хрупкого материала**

Для хрупких материалов испытание на сжатие является основным. Образцы доводят до разрушения, а предел прочности определяют, как при растяжении.

Диаграмма сжатия хрупкого материала по виду напоминает диаграмму при растяжении (рис. 3.7, а). Ввиду незначительных отличий в значениях модуля упругости при растяжении и сжатии начальные участки диаграмм совпадают.



*σ*

**







*растяжение*

*сжатие*

*ε*

*F*

*F*

*τmax*

*45°*

*б*

*a*

Рис. 3.7. Диаграммы деформирования хрупкого материла при сжатии

и растяжении (а), вид разрушения образца при сжатии (б)

Разрушение происходит при незначительных деформациях за счет сдвига одной части образца относительно другой. Плоскость сдвига наклонена примерно под углом 45° к оси (рис. 3.7, б).

Большинство хрупких материалов имеют предел прочности при сжатии в 2–3 раза выше, чем при растяжении.

В результате проведения механических испытаний устанавливают предельные напряжения, при которых происходит нарушение работы работы или разрушение детали конструкции.

***Предельным напряжением*** *при статической нагрузке для пластичных материалов является предел текучести, для хрупких – предел прочности.*

**Допускаемые напряжения**

Конечной целью расчета любой конструкции является использование полученных результатов для оценки пригодности этой конструкции к эксплуатации при минимальной затрате материала.

Любой элемент конструкции и любая машина или аппарат под действием эксплуатационных нагрузок должны обладать достаточной прочностью. В химическом машиностроении чаще всего применяют метод расчета по напряжениям.

*По методу расчета по напряжениям предполагают, что вероятность разрушения максимальна в той точке, где напряжения максимальны.*

Считают, что прочность элемента конструкции будет нарушена в том случае, если хотя бы в одной его точке возникнут остаточные деформации или появится хрупкое разрушение.

Механические испытания позволяют определить эти напряжения, называемые предельными. В дальнейшем при определении опасной точки в детали (где напряжения максимальны) проводят их сравнение с предельными напряжениями для материала.

Для надежной работы машина или аппарат должны обладать определенным *запасом прочности*, т.е. расчетные напряжения должны быть меньше предельных. Это вызвано схематизацией расчетного объекта, отклонением механических характеристик от справочных данных, возникновением непредвиденных нагрузок в период эксплуатации и др.

*Отношение предельного напряжения к наибольшему расчетному напряжению в элементе конструкции называют* ***коэффициентом запаса прочности***

. 3.4

Значение *n* всегда больше единицы. На основе опыта эксплуатации различных конструкций устанавливают *минимально необходимые значения коэффициента* запаса прочности, эти значения называют *допускаемыми* (нормативными). Допускаемые значения коэффициента запаса прочности зависят от свойств, качества и однородности материала, точности представления о нагрузках, действующих на конструкцию, ответственности конструкции и др. и, как правило, регламентируются нормативно-техническими документами (ОСТ, ГОСТ, СТБ, СНиП, ТУ и пр.).

В большинстве случаев коэффициент запаса выбирают по типовым значениям из справочной литературы. Для пластичных материалов принимают , для хрупких – .

Если размеры конструкции известны, то расчет на прочность является проверочным и *условие прочности* записывается следующим образом:

. 3.5

Когда конструкция находится на стадии проектирования, значение *n* задают заранее (значения см. выше), вычисляя допускаемое напряжение, выше которого не должно становиться максимальное напряжение в работающей конструкции.

***Допускаемое напряжение*** *– это опасное напряжение для данного материала, деленное на коэффициент запаса прочности* ***n*** *(коэффициент безопасности):*

. 3.6

В этом случае *условие прочности* записывается так:

. 3.7

*Предельное (опасное) напряжение* соответствует прочностным характеристикам материалов:

– для пластичных материалов – предел текучести;

– для хрупких материалов – предел прочности;

– для хрупко-пластичных материалов – условный предел текучести.

Допускаемые напряжения для большинства традиционных материалов и конструкций, как правило, приводятся в справочной литературе.

**Расчет на прочность при растяжении (сжатии)**

Определив напряжения в опасном сечении растянутого (сжатого) стержня по формуле (2.4) и установив допускаемые напряжения в соответствии с соображениями, описанными выше, можно провести оценку прочности стержня.

Для этого необходимо фактические напряжения в опасном сечении стержня сравнить с допускаемыми:

, 3.8

где  – наибольшее значение продольного силового фактора, на участке стержня с площадью *А* (берут только из эпюры).

Если допускаемые напряжения при растяжении и сжатии различны, то их обозначают или соответственно.

Записанное неравенство называется *условием прочности при растяжении (сжатии)*.

***Условие прочности*** *– возникающее напряжение в опасном сечении не должно превышать допускаемое.*

При расчете конструкций на прочность встречаются три типа задач, различающихся формой использования расчетной формулы:

1. *Проверка прочности стержня*. Определяется фактическое напряжение по заданным нагрузке и размерам поперечного сечения и сравнивается с допускаемым. Расчет выполняется непосредственно по формуле 3.8.

Фактические напряжения не должны превышать допускаемые более чем на 5% и не должны быть меньше допускаемых более чем на 10%. Перенапряжение больше этого значения недопустимо с точки зрения прочности, а недонапряжение говорит о перерасходе материала.

Фактический запас прочности определяется как отношение  для пластичных материалов или  – для хрупких.

2. *Проектный расчет*, при котором определяются (по известной нагрузке и допускаемому напряжению) размеры поперечного сечения стержня, требуемые из условия прочности, по формуле:

. 3.9

3. *Определение допускаемой продольной силы* по заданным размерам поперечного сечения и известному допускаемому напряжению ведется по формуле:

. 3.10

Определив допускаемую продольную силу (внутренний силовой фактор) и установив связь между продольной силой и нагрузкой (используя метод сечений), можно определить допускаемую нагрузку.

**Контактные напряжения. Смятие.**

Если детали конструкции, передающие значительную сжимающую нагрузку, имеют небольшую площадь контакта, то может произойти смятие поверхностей деталей. Для предотвращения смятия, например, под гайки и головки болтов подкладывают шайбы для увеличения площади контакта (рис. 3.8, а).

*F*

*σсм*

*d*

*δ*

*Условная*

*площадь*

*смятия*

*Напряжения*

*смятия*

*Действительная*

*поверхность смятия*

*а*

*б*

Рис. 3.8. Напряжения (а), действительная и условная поверхности (б) при смятии

Для простоты расчетов полагают, что при контакте по плоскости возникают нормальные напряжения смятия, равномерно распределенные по площади контакта. Расчетное уравнение на смятие имеет вид:

, 3.11

где *F* – сжимающая сила, [σсм] – допускаемое напряжение на смятие, *A*см – площадь контакта (смятия).

Если соприкасающиеся материалы сделаны из разных материалов, то на смятие проверяют более мягкий материал.

При контакте двух деталей по цилиндрической поверхности (например, заклепочное соединение) закон распределения напряжений смятия по поверхности контакта сложен (рис. 3.8, б). Поэтому при расчетах на смятие цилиндрических отверстий в расчетную формулу подставляют не площадь боковой поверхности полуцилиндра, по которой происходит контакт, а значительно меньшую площадь диаметрального сечения отверстия (условная площадь смятия), тогда

, 3.12

где *d* – диаметр отверстия, δ – толщина соединяемой детали (высота цилиндра).

При различной толщине соединяемых деталей в расчетную формулу подставляют наименьшую толщину.