

М.Ю. СЕРЕГИН

ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ

Часть 2

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

УДК 620.1(075)
ББК Ж3-1я73
С325

Рецензенты:

Начальник отдела АСУ Тамбовского ЦСМ
Д.Ю. Крылов

Доцент кафедры "Криминалистика и информатизация
правовой деятельности" ТГТУ
кандидат технических наук
А.В. Терехов

Серегин, М.Ю.

С325 Организация и технология испытаний : в 2 ч. Ч. 2: Автоматизация испытаний : учебное пособие / М.Ю. Серегин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 96 с. – 100 экз. – ISBN 5-8265-0547-8.

Учебное пособие является базовым при изучении дисциплины "Организация и технология испытаний".

Предназначено для студентов 5 курса специальностей 200503 и 220501. Рекомендуется также студентам и магистрантам для организации самостоятельной работы по изучению методов и процедур проведения испытаний продукции и материалов.

УДК 620.1(075)

ББК Ж3-1я73

ISBN 5-8265-0547-8

© Серегин М.Ю., 2006

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный
технический университет" (ТГТУ), 2006

Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

М.Ю. СЕРЕГИН

ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ

Часть 2

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Утверждено Ученым советом университета
в качестве учебного пособия



Тамбов
Издательство ТГТУ
2006

Учебное издание

СЕРЕГИН Михаил Юрьевич

ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ

Часть 2

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 15.12.2006.

Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
5,5 уч.-изд. л. Тираж 100 экз. Заказ № 814

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Испытания являются одним из важнейших этапов жизненного цикла продукта. Правильная организация испытаний позволяет своевременно устранить брак и повысить качество получаемой продукции. Достоверные результаты испытаний – залог правильной настройки оборудования и один из важнейших факторов достижения эффективного производства.

Автоматизация испытаний является одним из важнейших факторов, позволяющих повысить качество проведения испытаний и достоверность получаемых результатов. Кроме того, автоматизация позволяет сократить время на проведение испытаний и многократно увеличить производительность. В определенных случаях, например при исследовании быстропротекающих процессов, создание автоматизированной системы испытаний является единственно возможным решением для получения необходимых результатов.

1. ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

1.1. ИСПЫТАНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ И ПОЛЗУЧЕСТЬ

Длительные испытания служат для изучения поведения материалов при постоянном нагружении в зависимости от температуры и времени.

Различают длительные статические испытания при постоянном и снижающемся напряжении.

1.1.1. ИСПЫТАНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ

При длительных испытаниях деформация образца происходит не за счет управляемого перемещения одного из захватов (траверсы) испытательной машины, как при статическом испытании на растяжение, а в результате постоянного нагружения, которое осуществляют, например, с помощью непосредственно подвешенных грузов или рычажного нагружения.

При этом, вследствие процессов ползучести, протекающих с различной интенсивностью в зависимости от времени нагружения, деформация образца увеличивается. Ниже представлены интервалы температур для длительных испытаний различных групп материалов:

Тип материала	Температура, К
Полимеры	$\geq 300^*$
Нелегированные стали	До 650
Низколегированные стали (феррито-перлитная структура)	820
Высоколегированные стали (ферритная структура)	920
Высоколегированные стали (аустенитная структура)	1020
Высокотемпературные материалы	1500

* Самая высокая температура меньше или равна максимальной рабочей температуре.

При длительных испытаниях определяют важнейшие характеристики. Пределом ограниченной длительной прочности $\sigma_{в/время}$ при данной температуре называют величину постоянной нагрузки, вызывающей разрушение образца через определенное время, отнесенную к его начальному поперечному сечению при комнатной температуре.

Если разрушение наступает, например, через 1000 ч, получают значение предела ограниченной длительной прочности $\sigma_{в/1000}$.

Пределом ползучести при испытаниях на длительную прочность называют напряжение, которое вызывает определенную величину деформации за установленное время испытания. При длительных испытаниях на растяжение определяют предел ползучести как предельное напряжение σ , индексами у которого являются остаточное удлинение (%) и время (ч).

Пределом скорости ползучести называют напряжение, которое за определенное время вызывает определенную скорость ползучести или скорость деформации. В качестве индекса указывают скорость ползучести, выраженную в $10^{-4}\%/ч$. Например, при скорости ползучести $5 \cdot 10^{-4}\%/ч$ в интервале между 5...30 часами предел скорости ползучести обозначают $\sigma_{5...30}$.

Удлинение после разрушения при длительных испытаниях обозначают δ , в индексе указывают отношение между расчетной длиной и диаметром образца, а также время в часах, например $\delta_{5/1000}$.

Для полимерных материалов, кроме того, определяют остаточную деформацию $\epsilon_{R(t)}$ в определенный момент после разгрузки образца, например остаточную деформацию через 1 мин – $\epsilon_{1мин}$.

Для выяснения поведения исследуемого материала при данной температуре устанавливают временные зависимости остаточного удлинения при различных нагрузках и изображают их графически. Металлические материалы желательно испытывать в течение 100 тыс. ч, в то время как для полимерных материалов предусматривают выдержку 10 тыс. ч.

По построенным зависимостям деформации от времени испытания определяют, например, время для получения остаточного удлинения 0,2 % или соответствующее разрушению образца и наносят на диаграмму длительных статических испытаний (рис. 1). Так получают временные зависимости разрушающих напряжений и напряжений, вызывающих остаточную деформацию 0,2 % (верхняя часть рис. 1). С помощью диаграмм длительных статических испытаний определяют предел ползучести и предел ограниченной длительной прочности путем интер- или экстраполяции.

Экстраполяцию по времени можно проводить, как правило, в пределах одного порядка; значения относи-

тельного удлинения и сужения после разрушения при длительных испытаниях не экстраполируют.

На рис. 2 представлены временные зависимости разрушающих напряжений для различных полимерных материалов при комнатной температуре в интервале $10^{-2} \dots 10^4$ ч.

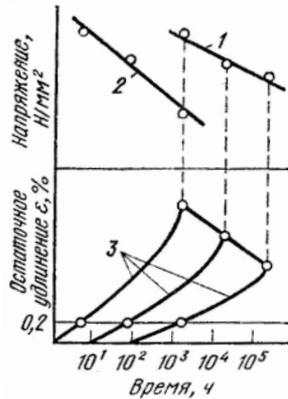


Рис. 1. Построение диаграммы длительных статистических испытаний:

1 – линии разрушающих напряжений;
2 – линия напряжений, вызывающих удлинение $\epsilon_{bl} = 0,2 \%$;
3 – кривые зависимости деформации от времени при различных нагрузках

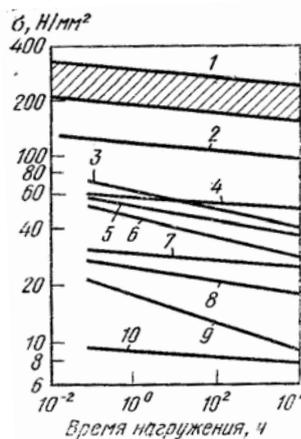


Рис. 2. Зависимость разрушающих напряжений от времени для различных полимерных материалов:

1 – GF-UP (упрочненный тканью); 2 – GF-UP (упрочненный волокном); 3 – PMMA; 4 – PC;
5 – PUC; 6 – PS (вязкий); 7 – PS (вязкий);
8 – PP; 9 – PE (HD); 10 – PE (ND)

На рис. 3 показано влияние специального сорта полиэтилена при что линии разрушения при длительных более низких напряжениях, чем выше поведение полимерных материалов при сильно влияют условия обработки, а также

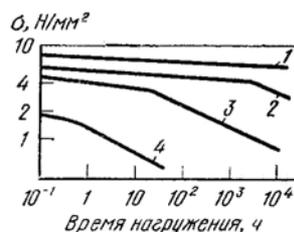


Рис. 3. Зависимость разрушающих напряжений полиэтилена от времени при температуре К:

1 – 290; 2 – 310; 3 – 330; 4 – 350

температуры на поведение длительном нагружении. Видно, выдержках имеют излом при тем температура испытания. На длительном нагружении, кроме того, окружающая среда.

1.1.2. ИСПЫТАНИЯ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

В случае длительных испытаний перехода части упругой деформации в при определенной температуре подвергают постепенное уменьшение напряжения

При этом получают следующие ха-

- скорость релаксации напряжений напряжения в образце;

- сопротивление релаксации напряжений, которое устанавливают при определенной температуре и начальной деформации по истечении определенного времени. Сопротивление релаксации обозначают σ с индексом $E/\text{время, ч}$ (начальная деформация, %). Например, сопротивление релаксации после 24 ч испытаний при начальной деформации 0,3 % следует записать $\sigma_{E/24(0,3)}$ Н/мм².

Кроме длительных статических испытаний при постоянном и снижающемся напряжении и постоянной температуре, имеется третий вид длительных испытаний, при котором рабочая температура изменяется в зависимости от протекающей деформации.

1.2. ИСПЫТАНИЯ ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

На многие детали машин и элементы конструкции действуют динамические нагрузки в режиме колебаний. При этом под колебаниями понимают не только движение масс различных систем, но и повторно-переменные нагрузки разного вида. На рис. 4 представлены области частот колебаний циклических нагрузок, имеющих место в различных машинах и конструкциях.

В простейшем случае речь идет о чисто синусоидальных колебаниях, но в общем случае следует учитывать также, например, гармонические или случайные колебания.

при снижающемся (за счет пластическую) напряжении образец начальной деформации и измеряют (релаксацию).

рактические;

– скорость, с которой уменьшаются

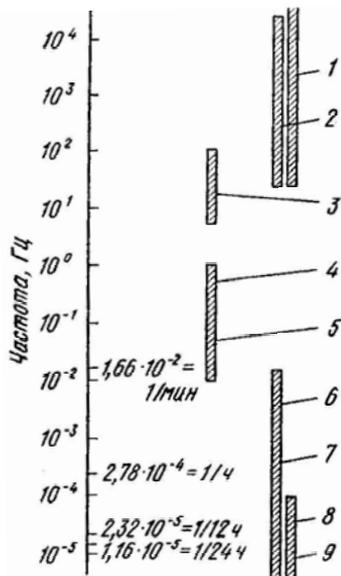


Рис. 4. Области частот колебаний циклических нагрузок:
 1 – резонансные колебания;
 2 – звуковые колебания;
 3 – колебания нагрузок, действующих на детали автомобилей из-за неровности дороги;
 4 – колебания при движении корабля;
 5 – колебания при полете самолета;
 6 – колебания нагрузок, возникающих при движении различных транспортных средств и в резервуарах;
 7 – колебание ветровой нагрузки, действующей на строительные сооружения;
 8 – температурные колебания;
 9 – колебания снеговой нагрузки

Подобное нагружение может привести к тому, что после определенного числа циклов нагружения происходит разрушение, хотя номинальные напряжения в детали не превышали статического предела упругости. Это явление, которое встречается как в кристаллических, так и в некристаллических материалах, часто называют усталостью, а вызванное им разрушение – усталостным.

Поскольку при этом протекают процессы, приводящие к необратимым изменениям в материале, лучше говорить о повреждении или разупрочнении, которые, в конечном счете, приводят к полному разрушению. Сопротивление материала или детали процессу накопления повреждений при циклическом нагружении определяется пределом выносливости. В случае циклического нагружения для установления (расчета) геометрических размеров детали нельзя использовать характеристики прочности, полученные при статических испытаниях, например предел текучести или временное сопротивление. В этом случае необходимо проводить испытания на усталость, с помощью которых можно определить предел выносливости или число циклов до разрушения, по которому можно установить срок службы данной детали.

Уже в середине прошлого столетия Велер разработал методику испытаний на усталость, которая находит применение (испытания по Велеру) до настоящего времени. В последние десятилетия эта методика была дополнена новыми положениями, касающимися проведения испытаний и обработки их результатов. Параллельно с этим для описания различных видов циклического нагружения и их учета при определении размеров конструкций выделилась специальная область механики твердого тела, занимающаяся усталостной прочностью и эксплуатационной стойкостью.

1.2.1. ПОВРЕЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛА И КРИТЕРИИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Повреждение материала и образование излома при усталости происходят в результате возникновения и постепенного распространения трещины. Для описания этого процесса оказалось целесообразным разделить его на три стадии:

- 1) распространение трещины вследствие ее постепенного роста и физических свойств;
- 2) распространение трещины вследствие ее постепенного роста до достижения критической величины трещины;
- 3) разрушение остаточного поперечного сечения.

1.2.1.1. Зарождение трещин. Во время циклического нагружения крисуноталлиты в поликрисуноталлах постоянно подвергаются действию переменных напряжений. Эти напряжения будут вызывать переменное движение дислокаций в тех крисуноталлитах, которые благоприятно ориентированы к направлению касательных напряжений. Уже после нескольких циклов нагружения движение дислокаций концентрируется на нескольких постепенно углубляющихся и расширяющихся усталостных полосах скольжения, что можно непосредственно наблюдать на поверхности.

В этих полосах скольжения протекание дислокационных реакций приводит к образованию дискообразных выдавливаниям (экструзиям) и углублений (интрузиям), которые рассматривают как первую стадию образования субмикроскопической трещины (рис. 5). Другая возможность трещинообразования, которая особенно проявляется при повышенных температурах, заключается в образовании микротрещин по границам зерен и поверхностям раздела фаз.

Наряду с процессами, вызывающими образование трещин на поверхности, внутри материала также происходит движение дислокаций, которое в зависимости от его структурного состояния вызывает разупрочнение или упрочнение материала. В результате происходит изменение механических и физических свойств. В то время как все чистые металлы с гранецентрированной и объ-

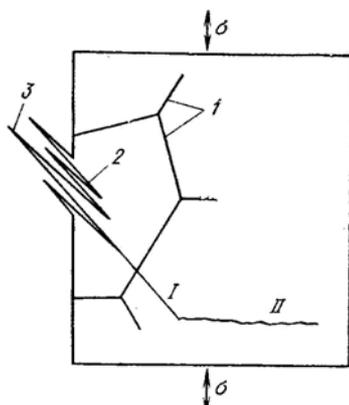


Рис. 5. Возникновение и распространение усталостной трещины на стадиях I и II:
 1 – граница зерна; 2 – интрузия;
 3 – экструзия

емно-центрированной кубической решеткой, а также малоуглеродистые стали при циклическом нагружении упрочняются, наклепанные металлы разупрочняются, причем интенсивность разупрочнения зависит от степени предварительного наклепа и интенсивности циклического нагружения. Для сталей при отношении $\sigma_T / \sigma_B \approx 0,6$ можно ожидать упрочнения при циклическом нагружении, а при $\sigma_T / \sigma_B > 0,8$ – разупрочнения.

Разупрочнение деталей после длительного срока службы может сделать актуальными проблемы стабильности. Изменение физических свойств, например электропроводности, позволяет обнаруживать повреждение материала уже на начальной стадии циклического нагружения.

1.2.1.2. Развитие трещин. При увеличении продолжительности циклического нагружения интрузии сначала растут в направлении максимальных касательных напряжений, т.е. распространяются в виде микротрещин в отдельных крисункоталлах под углом 45° к направлению действия внешних нормальных напряжений σ (I стадия роста трещины). Продолжительность этой стадии составляет, обычно, всего 1...5 % срока службы до разрушения. Вообще, при наличии концентраторов напряжений (надразов, резких переходов поперечного сечения), а также трещин, образовавшихся по технологическим причинам или из-за неоднородностей структуры, I стадия может полностью отсутствовать. Поэтому заключительную II-ю стадию роста трещины рассматривают как решающую в процессе повреждения, на которой происходит постепенное изменение направления распространения транскрисункоталлитной усталостной трещины. Оно становится перпендикулярным к направлению действия максимальных нормальных напряжений.

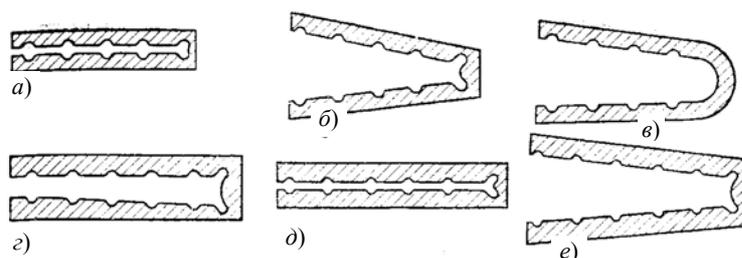


Рис. 6. Постепенный рост трещины при циклическом нагружении:
a – в ненагруженном состоянии; *b* – увеличение растягивающих напряжений;
в – максимальные растягивающие напряжения; *г* – увеличение сжимающих напряжений;
д – максимальные сжимающие напряжения;
е – увеличение растягивающих напряжений

В некоторых материалах, например в высокопрочных алюминиевых сплавах, стальных отливках и в чугуне с шаровидным графитом, наблюдается интеркрисункоталлитное распространение трещин. Чаще всего механизм распространения трещин на II стадии характеризуется постепенным дискретным ее продвижением при чередовании затупления и заострения вершины трещины (рис. 6). При циклическом нагружении периодически создаются новые поверхности трещины, что видно на поверхности излома в виде образующихся усталостных полос или бороздок (рис. 7). Эти бороздки образуются не только на металлах и полимерах, но также на дереве, бетоне, керамических и композиционных материалах. В пластической зоне, образующейся около вершины трещины, после циклического нагружения остаются внутренние остаточные напряжения сжатия, которые ниже определенного предела нагружения могут привести к частичному сжатию поверхностей трещины, так что дальнейшее продвижение трещины без явления объясняет образование

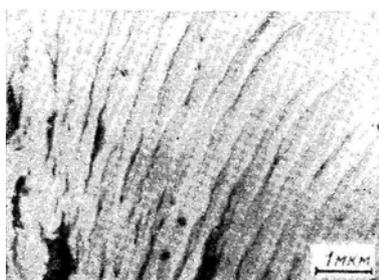


Рис. 7. Образование усталостных борозд на поверхности излома строительной стали на II стадии распространения трещины

рости распространения трещины зависимость от длины трещины a ,

$$da / dN = f(a, \sigma, M).$$

При этом скорость распространения

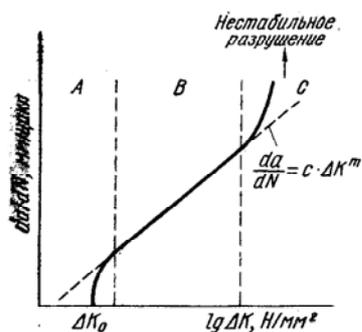


Рис. 8. Кривая роста усталостной трещины (схема):

A – рост трещины при $\Delta K > \Delta K_0$; при $\Delta K < \Delta K_0$ трещина не распространяется; *B* – непрерывный рост трещины с образованием бороздок; *C* – приближение к статическому разрушению

увеличение ее длины, отнесенное к соответствующей

Позднее, однако, было показано, что удовлетворительное соответствие экспериментальным результатам достигается только в том случае, если, исходя из концепций линейной механики разрушения, взаимосвязь между da / dN и размахом коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины ΔK будет представлена в виде

$$da / dN = c \Delta K^m, \quad (1.1)$$

где c и m – постоянные, зависящие от материала, соотношения между максимальным и минимальным напряжениями цикла и особенностей воздействия окружающей среды.

На рис. 8 графически представлена взаимосвязь между da / dN и ΔK . Влияние микроструктуры оказывается самым сильным в области *A* и *C*, во время как внешние условия нагружения прежде всего влияют в области *A* и

В.

Различный наклон прямых для разных материалов в области В, связанный с разными значениями показателя степени m , означает, что при более низком уровне напряжений скорость распространения трещины в одном материале больше, чем в другом, в то время как при более высоких напряжениях наблюдается обратное явление.

Область применения (1.1) можно расширить с помощью уравнения

$$da / dN = c [(0,5 - 0,4R) \Delta K]^m, \quad (1.2)$$

где $R = K_{\min} / K_{\max}$ – отношение минимального и максимального коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещины, возникающих во время циклического нагружения. Интегрированием уравнений (1.1) или (1.2) можно определить число циклов до разрушения и рассчитать срок службы циклически нагружаемой детали.

При упруго-пластической циклической деформации, например, вызванной периодическими изменениями давления в резервуаре высокого давления, большая часть срока службы приходится также на II стадию роста трещины. В этом случае говорят о малоциклового или кратковременной усталости, так как уже $10^1 \dots 10^4$ циклов могут привести к разрушению. Рост трещины в этом случае описывается выражением Мансона–Кохфина

$$N_B^n \epsilon_p = c, \quad (1.3)$$

где N_B – число циклов до разрушения; ϵ_p – амплитуда пластической деформации; c, n – константы (n чаще всего равно 0,5).

Для исследования малоциклового усталости проводят циклические испытания с постоянной или переменной амплитудой деформации.

1.2.1.3. Усталостный излом. Постепенно растущая усталостная трещина после 50...60 % срока службы достигает такого размера, что становится видимой невооруженным глазом.

При длине или глубине трещины 0,5...1 мм ее можно рассматривать уже не как микротрещину, а как трещину в инженерном понимании.

После того как усталостная трещина займет достаточно большую часть сечения образца или детали в оставшейся части поперечного сечения, действующие напряжения превысят статическую прочность материала. Это приводит к полному излому (долому) образца или детали при распространении нестабильной трещины (рис. 9). Таким образом, на поверхности изломов, образовавшихся при циклическом нагружении, различают две макроскопические зоны: зону постепенного распространения трещины усталости на II стадии с относительно ровной поверхностью и зону долома при последних циклах нагружения с шероховатой и испещренной трещинами поверхностью.

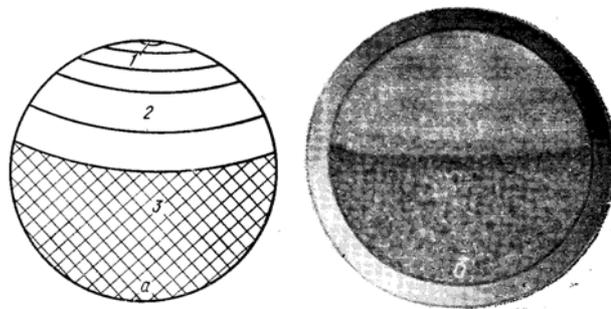


Рис. 9. Усталостный излом:

a – схема макроскопического излома; b – одноочаговый усталостный излом;

1 – фокус излома; 2 – область постепенного распространения трещины с линиями усталости; 3 – зона долома

Рассмотрение поверхности усталостного излома даже невооруженным глазом или с помощью лупы (макрофрактография) позволяет получить важную информацию о причинах излома, опираясь на которую можно объяснить причины эксплуатационных разрушений.

Линии усталости, возникающие вследствие временной остановки трещины при прекращении нагружения, являются существенной отличительной особенностью усталостных изломов. Отношение размеров зоны постепенного роста трещины и зоны долома является мерой величины циклических напряжений, приводящих к разрушению.

На рис. 10 показана характерная форма усталостных трещин при различных видах нагружения. С развитием микрофрактографии, особенно после применения растровых электронных микроскопов, появилась возможность исследовать процесс развития усталостных трещин в микроскопических областях и определять скорость распространения трещины по расстоянию между бороздками, приведенными на рис. 7.

Вид нагружения	Высокие номинальные напряжения		Низкие номинальные напряжения	
	Гладкий образец	Надрезанный образец	Гладкий образец	Надрезанный образец
Растяжение				
Односторонний изгиб				
Двусторонний изгиб				
Круговой изгиб				
Кручение			То же, что при высоких номинальных напряжениях	

Рис. 10. Форма усталостных трещин при различных видах нагружения

1.2.1.4. Факторы, влияющие на долговечность. На процесс повреждения и тем самым на долговечность при циклическом нагружении влияют многие факторы.

Температура. Образование и распространение трещины в металлических и неметаллических материалах с повышением температуры облегчаются из-за большего относительного влияния термически активируемых процессов. При $T > 0,5T_s$ (T_s – температура плавления) следует учитывать явление ползучести материала; при этом становится заметным влияние частоты нагружения. При низких температурах сопротивление распространению трещины увеличивается.

При частых теплосменах из-за возникновения термических напряжений также может произойти усталостное разрушение. Чтобы экспериментально определить сопротивление термической усталости, цилиндрические образцы попеременно нагревают и охлаждают.

Частота циклов. Влияние частоты циклов нагружения на долговечность определяется зависимостью деформационных процессов от времени и влиянием окружающей среды.

В металлических материалах скорость роста трещины с увеличением частоты снижается. Имеются указания, что при очень высоких частотах нагружения (>10 кГц) наблюдается обратная зависимость, что, вероятно, связано с разогревом материала.

Состояние поверхности. Так как усталостные трещины почти всегда начинаются от мест концентрации напряжений на поверхности, ее состояние является особенно важным фактором.

Наряду с конструктивно обусловленными надрезами, связанными с изменением поперечного сечения деталей, сверлением и т.д., на срок службы отрицательно влияют концентраторы напряжений (подрезы, коррозионные язвы, также дефекты сварки, закатанные пленки), а также чистота обработки поверхности (шероховатость).

На рис. 11 показано влияние поверхности на долговечность прочности на растяжение.

С другой стороны, с помощью поверхностной обработки можно существенно повысить срок службы изделия. Особенно холодная пластическая деформация, обработка, а также поверхностная цементация или азотирование. процессы связаны с образованием на ней сжатия.

Влияние окружающей среды. в контакте с поверхностью трещины, вследствие физико-химических

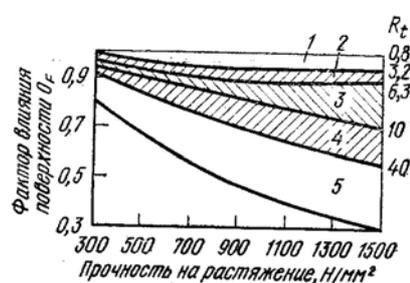


Рис. 11. Влияние обработки поверхности на долговечность сталей различной прочности:

- 1 – полировка; 2 – шлифовка;
 - 3 – механическая обработка резцом;
 - 4 – черновая обдирка; 5 – окисленная поверхность после прокатки;
- R_t – величина дефектов поверхности

службы циклически нагружаемых траторы напряжений (подрезы, коррозионные язвы, также чистота обработки

различной обработки сталей в зависимости от

некоторых процессов существенно повысить срок благоприятны поверхностная накатка или дробеструйная химико-термическая обработка – Положительное влияние этих поверхности остаточных напряже-

Окружающая среда, находящаяся влияет на рост трещины процессов, протекающих в ее

вершине.

Скорость распространения трещины в металлических материалах в вакууме на 10...20 % меньше, чем на воздухе, из-за частичного сваривания неокисленных поверхностей трещины. Под влиянием жидких поверхностно активных сред на поверхности трещины могут образоваться адсорбционные слои, которые чаще всего ускоряют ее рост (эффект Ребиндера). Особенно плохо влияют активные коррозионные среды; в этом случае говорят о коррозионном растрескивании под действием циклических напряжений или коррозионной усталости.

Экструзии или интрузии, появившиеся на поверхности, ведут себя как активные области, в которых происходит анодное растворение. В результате такого локального коррозионного воздействия возникает коррозионная каверна, которая при дальнейшем циклическом нагружении является концентратором напряжения. Мероприятия по пассивной коррозионной защите, например нанесение гальванических защитных слоев, повышает сопротивление циклическому нагружению. При контактной усталости большое практическое значение имеет влияние применяемых видов смазки.

Структура. С повышением чистоты металлических материалов, особенно по содержанию вредных примесей (например, серы и газов), их долговечность повышается. Поэтому использование для изготовления деталей, работающих в условиях циклического нагружения, сталей вакуумной выплавки и разливки особенно целесообразно. Распространению трещины в многофазной структуре могут препятствовать мелкодисперсные выделения; это, например, объясняет повышение долговечности стали после закалки и высокого отпуска. Изменение величины зерна, напротив, оказывает небольшое влияние. Увеличение долговечности полимеров связано со степенью их кристалличности.

1.2.2. ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ

По различным возможным видам циклического нагружения испытания на усталость можно разделить на испытания при регулярном периодическом нагружении, при нескольких уровнях напряжения и при программном нагружении.

1.2.2.1. Циклические испытания при регулярном нагружении. Испытания на усталость при регулярном нагружении, или испытания по синусоидальному циклическому нагружению, характеризуют следующие показатели амплитуда напряжения σ_a , максимальное напряжение σ_{max} , минимальное напряжение σ_{min} , размах напряжения $2\sigma_a$.

Полный цикл изменения напряжения L .

Под средним значением напряжения понимают постоянное напряжение, на которое накладываются переменные напряжения с амплитудой σ_a ; σ_{max} является наибольшим значением напряжения в цикле приложения нагрузки независимо от знака. Справедливы следующие

$$\sigma_{cp} = 0,5 (\sigma_{max} + \sigma_{min}); \tag{1.3}$$

$$\sigma_a = \pm 0,5 (\sigma_{max} - \sigma_{min}). \tag{1.4}$$

В зависимости от условий проведения испытаний оговаривают либо среднее значение и амплитуду напряжения, либо максимальное и минимальное значение напряжения. Для того чтобы отличить выбранные характеристики нагружения от определенных в результате испытаний характеристик усталостной прочности, первые обозначают в индексах строчными буквами, а вторые – прописными. Способ нагружения обозначают также строчными буквами в индексе.

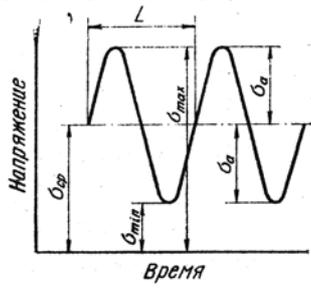


Рис. 12. Изменение напряжений во времени при регулярном циклическом нагружении

Велеру, проводят при нагружении. Процесс нагружения (рис. 12): среднее напряжение σ_{cp} , напряжение σ_{max} , минимальное напряжение называют циклом нагружения

σ_{cp} понимают постоянное напряжение, на которое накладываются переменные напряжения с наибольшим, а σ_{min} – наименьшим значением нагрузки независимо от соотношения:

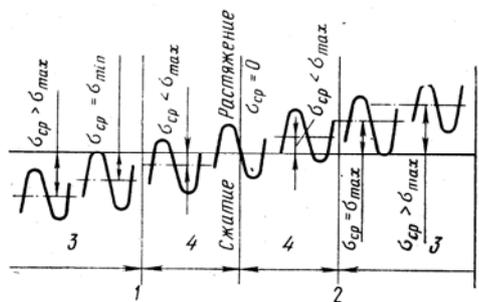


Рис. 13. Виды регулярного циклического нагружения:

1 – сжатие; 2 – растяжение; 3 – область действия знакопостоянного нагружения; 4 – область действия

В зависимости от указанных характеристик усталостные испытания при регулярном нагружении можно проводить при трех режимах, охватывающих семь разновидностей циклов напряжений (рис. 13). Испытания можно проводить в условиях действия:

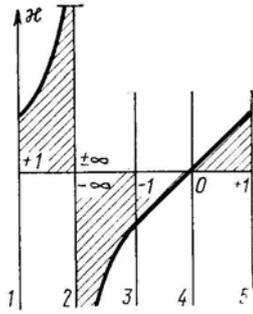


Рис. 14. Изменение коэффициента асимметрии цикла при различных режимах нагружения:

- 1 – статическое сжатие;
- 2 – отнулевой цикл напряжений при сжатии;
- 3 – симметричный цикл напряжений;
- 4 – отнулевой цикл напряжений при растяжении;
- 5 – статическое растяжение

- а) сжимающих напряжений (σ_{\max} и σ_{\min} отрицательны);
- б) знакопеременного цикла напряжений (σ_{\max} и σ_{\min} имеют различные знаки);
- в) растягивающих напряжений (σ_{\max} и σ_{\min} положительны).

Изменение коэффициента асимметрии цикла $\chi = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ при указанных режимах нагружения представлено на рис. 14.

Характеристикой усталостной прочности материала является предел выносливости σ_D . Он представляет собой значение напряжения, которое образец выдерживает без разрушения или без недопустимой деформации в течение сколь угодно длительного нагружения или, по меньшей мере, в течение заранее установленного числа циклов – так называемой базы испытания. Предел выносливости можно выразить через амплитуду напряжения σ_{AD} , а также через максимальное напряжение σ_{OD} .

Если при испытании задано среднее напряжение и предел выносливости определяют по максимальному напряжению, то

$$\sigma_{OD} = \sigma_{cp} + \sigma_{AD}. \quad (1.5)$$

Если, наоборот, задано максимальное напряжение и предел выносливости определяют по среднему напряжению, то

$$\sigma_M = \sigma_{\max} - \sigma_{AD}. \quad (1.6)$$

Очень часто используют два частных случая нагружения для определения предела выносливости:

- а) предел выносливости при симметричном цикле нагружения или $\sigma_{cp} = 0$ или $\chi = -1$, который равен

$$\sigma_{\omega} = \sigma_A = \sigma_{\max} = \sigma_{\min}; \quad (1.7)$$

- б) предел выносливости при отнулевом цикле нагружения $\sigma_{пл}$ для $\sigma_{cp} = \sigma_a$ либо $\chi = 0$ (растяжение), либо $\chi = \pm\infty$ (сжатие), который равен

$$\sigma_{пл} = 2\sigma_A. \quad (1.8)$$

Для определения предела выносливости проводят серию испытаний при регулярном нагружении с различными нагрузками. При этом среднее напряжение цикла σ_{cp} или минимальное напряжение цикла σ_{\min} поддерживаются постоянными, в то время как амплитуда напряжения σ_a или максимальное напряжение цикла σ_{\max} последовательно понижаются так, чтобы по результатам испытаний можно было установить предел выносливости.

Величины напряжений наносят на график зависимости их от числа циклов N , которые при данном напряжении образец выдержал до разрушения; при соединении отдельных точек получают кривую Велера (рис. 15). Как и следовало ожидать, эта кривая показывает изменение N при снижении амплитуды напряжений. Для металлических материалов, особенно конструкционных сталей, кривая Велера при N более определенного значения приближается к прямой, параллельной оси абсцисс. Особенно ясно виден этот переход при построении кривой Велера в двойной логарифмической системе координат (см. рис. 13, в). Этому граничному значению напряжения, при котором после бесконечно большого числа циклов нагружения не происходит разрушения, соответствует предел выносливости, выраженный через амплитуду напряжений. Для его определения испытания на усталость по Велеру нужно проводить вплоть до достижения определенного предельного числа циклов нагружения (базы испытания) N_G . Ниже представлены некоторые значения N_G , полученные экспериментально:

Сталь	10^7
Медь и медные сплавы	$5 \cdot 10^7$
Легкие металлы	10^8

Для полимеров или коррозионной усталости металлических материалов кривая Велера даже при очень большом числе циклов продолжает оставаться наклонной, что не дает возможности определить значение предела выносливости.

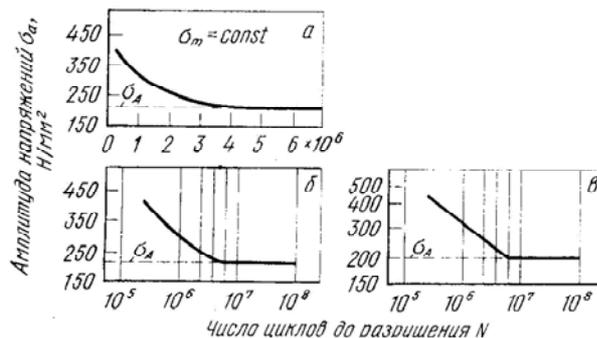


Рис. 15. Зависимость амплитуды напряжений σ_a и числа циклов до разрушения N (кривая Велера) в системах коор-

динат:

a – линейной; b – полулогарифмической; c – двойной логарифмической

Если амплитуда напряжения $\sigma_a > \sigma_D$, то после определенного числа циклов нагружения, определяемого по кривой Велера, происходит усталостное разрушение. В этом случае говорят об ограниченном пределе выносливости $\sigma(N)$:

$$\sigma(N) = \sigma_{cp} \pm \sigma_A. \quad (1.9)$$

В качестве примера можно привести такое написание ограниченного предела выносливости при знакопеременном растяжении: $\sigma_z(10) = (200 \pm 250) \text{ Н/мм}^2$; при этом напряжении разрушение наступает после 10^6 циклов.

В области ограниченной выносливости часто строят линии повреждаемости, по которым может быть зафиксировано начало заметного повреждения при образовании макроскопических трещин. Построение линий повреждаемости теряет свое значение с введением кривых роста усталостных трещин.

Для аналитического описания кривой Велера путем обработки многочисленных результатов испытаний выведены различные уравнения. Все они могут быть представлены в виде

$$\sigma = [\sigma_b + \sigma_D f(N)] / [1 - f(N)], \quad (1.10)$$

где σ_b – статическая прочность на растяжение; $f(N)$ – функция двух параметров, полученных из кривой Велера.

Усталостные испытания дают значительный разброс результатов. При определении долговечности сталей число циклов до разрушения может различаться в 10 раз, а значения предела выносливости могут отклоняться на $\pm 25\%$ от его средней величины.

Исходя из этого, при проведении испытаний на усталость и обработке их результатов целесообразно применять статистические методы. Тогда зависимость между амплитудой напряжений и числом циклов до разрушения, полученную из кривой Велера, можно дополнить значениями, характеризующими вероятность разрушения.

Для статистической обработки результатов испытаний необходимо испытать в области ограниченной выносливости на четырех уровнях напряжений, по крайней мере, по 10 образцов. При этом n экспериментально определенных величинах долговечности на каждом уровне напряжения располагают в вариационный ряд в порядке возрастания числа циклов до разрушения и снабжают порядковым номером m .

Вероятность разрушения P_a равна

$$P_a = 100m / (n + 1), \%. \quad (1.11)$$

Нанеся напряжение и число циклов на вероятностный график, можно выбирать их для любой вероятности разрушения и использовать для построения соответствующей кривой Велера.

Точное определение предела выносливости возможно с помощью метода ступенчатого изменения нагрузки. При этом испытания начинают с амплитуды напряжения, соответствующей ожидаемому значению предела выносливости, и затем, если образец в пределах базы испытания разрушается или проходит базу без разрушения, следующее испытание проводят при более низкой на одну ступень или при более высокой на такую же ступень амплитуде напряжений соответственно. По результатам испытаний определяют среднее значение предела выносливости:

$$\bar{\sigma}_D = \sigma_x + d(A/F \pm 0,5), \quad (1.12)$$

где $\bar{\sigma}_D$ – среднее значение предела выносливости; σ_x – наиболее низкое напряжение, при котором происходило менее часто встречающееся событие, причем под событием понимают разрушение или отсутствие разрушения; d – выбранный интервал между ступенями амплитуды напряжения:

$$A = \sum f_i i; \quad F = \sum f_i,$$

где f_i – частота события на ступени; i – номер ступени.

Знак "плюс" используют при проведении расчета по неразрушенным образцам, знак "минус" – при проведении расчета по разрушенным образцам. Стандартное отклонение среднего значения предела выносливости

$$s = 1,62d \left(\frac{FB - A^2}{F^2} + 0,029 \right), \quad (1.13)$$

где $B = \sum i^2 f_i$.

Требуемое число образцов для определения предела выносливости по методу ступенчатого изменения нагрузки зависит от точности выбора предполагаемого значения предела выносливости и составляет 10...40.

1.2.2.2. Обобщенные диаграммы циклической прочности. Из кривой Велера получают значения предела выносливости только для данного определенного вида нагружения. Чтобы охарактеризовать поведение материала при всех видах нагружения, суммируют результаты, представленные в различных кривых Велера, в полную диаграмму усталости. Она имеет большое значение для определения конструктивных размеров циклически нагруженных деталей.

В диаграмме Смита (рис. 16) по оси абсцисс отложено среднее напряжение, а на оси ординат в том же

масштабе – максимальное или минимальное напряжение.

Диаграмму образуют две линии, которые ограничивают область предела выносливости материала для различных случаев нагружения.

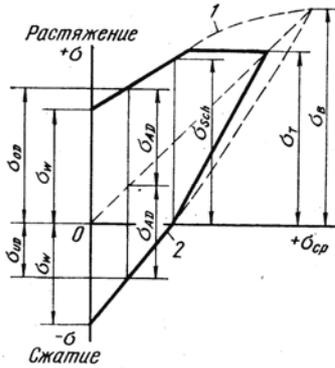


Рис. 16. Диаграмма предельных напряжений цикла (диаграмма Смита) для положительного среднего напряжения:

1 – границная линия максимального напряжения; 2 – границная линия минимального напряжения

Предел выносливости при симметричном знакопеременном цикле нагружения ($\sigma_{ср} = 0$) определяется точками пересечения диаграммы с осью ординат, в то время как предел выносливости при отнулевом цикле напряжений соответствует перпендикуляру, проведенному вверх из точки пересечения одной из линий диаграммы с осью абсцисс.

С увеличением значения среднего напряжения обе линии сближаются, что свидетельствует об уменьшении амплитуды напряжения σ_A , соответствующей пределу выносливости.

В точке пересечения обеих кривых $\sigma_A = 0$. Эта точка, разрушение в которой вызвано только средним напряжением, влияющим как статическое, соответствует временному сопротивлению при растяжении σ_B . Если пластическая деформация циклически нагруженной детали не допустима, полную диаграмму усталости нужно ограничить линией, параллельной оси абсцисс на высоте предела текучести σ_T , и присоединить к ней граничную линию минимальных напряжений.

Упрощенная полная диаграмма усталости для вязких материалов (стали) может быть построена по пределу выносливости при симметричном знакопеременном нагружении σ_{-1} и пределу текучести σ_T ; для хрупких материалов – по пределу выносливости σ_{-1} и временному сопротивлению σ_B (рис. 17). Для материала, имеющего равные показатели сопротивления усталости при нагружении в области растяжения и сжатия, полные диаграммы усталости симметричны. В других случаях, как например у чугуна с пластинчатым графитом, они не симметричны.

при нагружении в области растяжения и сжатия, полные диаграммы усталости симметричны. В других случаях, как например у чугуна с пластинчатым графитом, они не симметричны.

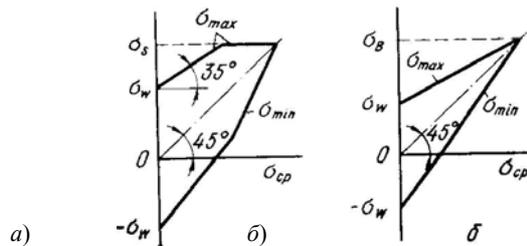


Рис. 17. Упрощенное построение неполных хрупких б) материалов

Диаграмма Смита находят машиностроении; для строительных диаграмму усталости Мура–Коммерса–построении на оси ординат откладывают напряжения σ_{max} , а на оси абсцисс – максимального напряжений $\chi = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ новые характеристики поведения нагружении. Наряду с построением делением скорости ее роста da / dN в повреждаемости и основы для расчетного брать (из соотношения K_{min} / K_{max}) коэффициента интенсивности ходимого для дальнейшего значение коэффициента интенсивности циклических напряжений ΔK_{max} определяется как предел выносливости при наличии трещины.

В противоположность пределу выносливости σ_D предел выносливости при наличии трещины можно определить с достаточной точностью при испытании одного образца.

1.2.2.3. Испытания с концентраторами напряжений. На усталостную прочность деталей сильно влияют изменения формы, надрезы, сверления и другие концентраторы напряжений, вызывающие их неравномерное распределение. Влияние местного повышения напряжения вблизи надреза выражают теоретическим коэффициентом концентрации напряжений (рис. 19):

$$\alpha_K = \sigma_{max} / G_N > 1. \quad (1.14)$$

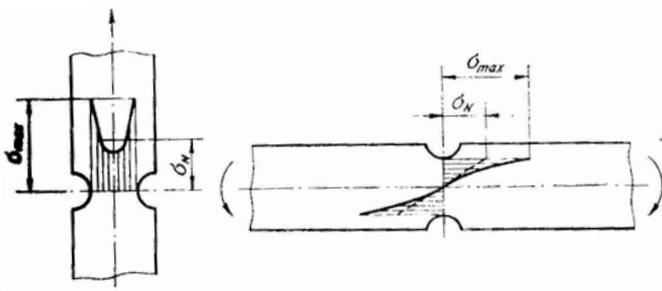
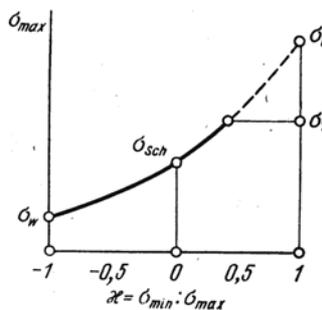


Рис. 18. Полная диаграмма усталости Мура–Коммерса–Яспера



диаграмм усталости для вязких а) и

применение прежде всего в сталях используют полную Яспера (рис. 18). При ее величину максимального отношение минимального и В механике вводят некоторые материалов при циклическом кривых роста трещины и опре-качестве критерия определения размеров можно вы-наименьшее значение циклических напряжений, необ-распространения трещины. Это

Рис. 19. Концентрация напряжений надреза при растяжении и изгибе

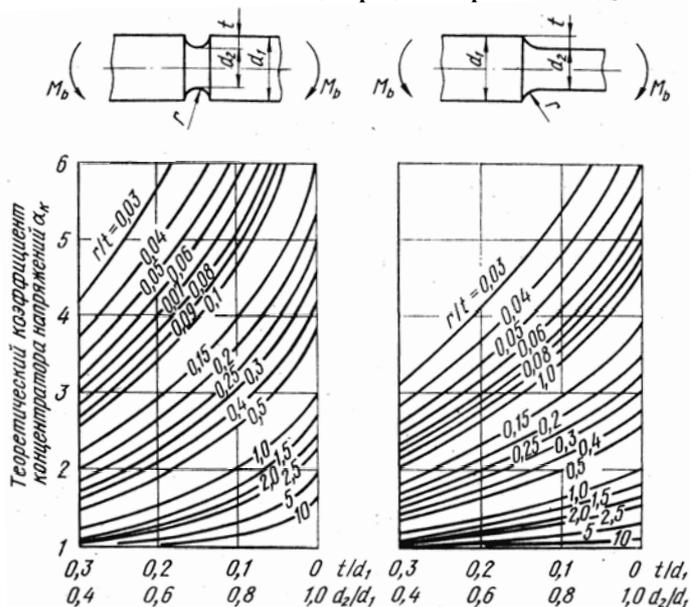


Рис. 20. Теоретический коэффициент концентрации напряжений α_K для вала при изгибе

На рис. 20 представлены числовые значения α_K вала, к которому приложена изгибающая нагрузка. При этом, однако, обнаружено, что значения α_K , определенного в соответствии с теорией упругости, еще недостаточно, чтобы определить предел выносливости надрезанного образца как предельную прочность при циклическом нагружении для детали данной формы.

Кроме того, необходимо учитывать влияние свойств данного материала, для чего вводят экспериментально определяемый эффективный коэффициент концентрации напряжений, учитывающий влияние надреза на усталостную прочность образца:

$$\beta_K = \sigma_D / \sigma'_D > 1, \quad (1.15)$$

где σ_D и σ'_D – пределы выносливости гладкого и надрезанного образцов соответственно.

Расчетная предельная прочность детали при циклическом нагружении σ_{nD} может быть получена из отношения

$$\sigma_{nD} = \sigma_D / \beta_K. \quad (1.16)$$

Полностью учесть влияние формы можно только путем натурных испытаний целой детали на усталость.

1.2.2.4. Суммирование повреждений. При использовании двух уровней нагружения можно увеличить количество информации, получаемой с помощью кривых Велера (рис. 21). При этом получают кривые повреждаемости, которые позволяют проследить за ходом накопления повреждений при циклическом нагружении. Из данных рис. 21, б следует, что с помощью циклического нагружения при низких амплитудах напряжений на первой ступени можно достичь сначала "отрицательного" повреждения и, следовательно, повысить долговечность при нагружении на второй ступени.

Ход процесса повреждения при нескольких уровнях нагружения определяют с помощью математического закона накопления повреждений.

Согласно гипотезе линейного накопления повреждений Пальмгрена–Майнера принимают, что повреждение, вызываемое циклическим нагружением за n циклов, пропорционально отношению n / N (N – число циклов до разрушения по кривой Велера) и общее повреждение не зависит от последовательности частичных повреждений. По этой гипотезе усталостный излом наступает, когда повреждение S достигает величины

$$S = n_1 / N_1 + n_2 / N_2 + \dots + n_q / N_q = \sum_{i=1}^q n_i / N_i = 1. \quad (1.17)$$

На рис. 21, б эта зависимость представлена в виде прямой, идущей под углом 45° .

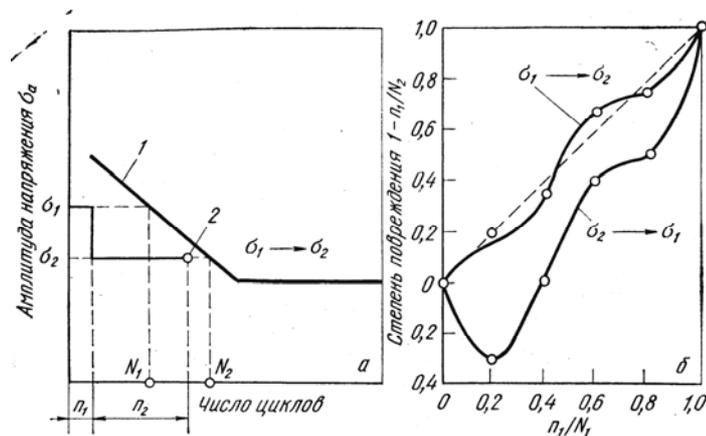


Рис. 21. Построение кривой повреждаемости при испытании на двух уровнях нагружения:
 а – схема испытания; б – кривая повреждаемости для стали, содержащей 0,35 % С, при различной последовательности нагружения;

1 – кривая Велера; 2 – разрушение при двухступенчатом нагружении

Гипотеза накопления повреждений позволяет теоретически оценить срок службы детали на основе кривой Велера, если ввести определенные предположения о характере эксплуатационного нагружения.

Испытания при нескольких уровнях напряжений применяют также с целью сокращения продолжительности испытаний при определении предела выносливости. Если предположить, что уравнение Майнера справедливо, то можно определить предел выносливости путем ступенчатого последовательного увеличения уровня амплитуды напряжения во время испытания (метод Локати).

1.2.2.5. Испытания при программированном нагружении. Испытания на одном или нескольких уровнях нагружения позволяют получать характеристики сопротивления разрушению только при синусоидальном циклическом нагружении. В то же время большинство деталей, особенно в самолето-, станко-, автомобилестроении и сельскохозяйственном машиностроении, во время эксплуатации подвергается воздействию напряжений, которые постоянно изменяются по величине и направлению. Для того чтобы получить характеристики сопротивления повреждаемости при этих эксплуатационных условиях нагружения, поддающихся только статистическому описанию, необходимо определить эксплуатационную усталостную долговечность. Это можно сделать путем испытаний при программированном блочном нагружении, которые применяют уже в течение 40 лет. При этом сначала необходимо определить величину, повторяемость, последовательность и частоту напряжений, которые воздействуют на деталь в течение всего срока службы.

Эта последовательность нагружения, называемая блоком нагружения, может быть установлена при использовании определенной классификации, согласно которой напряжение делят на несколько групп (ступеней) и затем определяют частоту превышения напряжениями границ соответствующей группы (блока). Полученные данные (блок нагружения) используют для управления испытательной машиной. Различные варианты испытаний с программированным нагружением (рис. 22) в определенной мере характеризуют долговечность детали в условиях, близких к реальным.

Дальнейшей проблемой является учет изменяющихся средних напряжений, которые возникают, например, из-за неравномерного расположения грузов или при изменении массы самолета вследствие сгорания горючего во время полета. С введением сервогидравлики удалось также ввести испытания на усталость с нестационарным случайным нагружением.

Для проведения таких испытаний вначале, в реальных условиях эксплуатационного нагружения, проводят замеры изменения напряжений непосредственно в процессе работы деталей и записывают эти данные на перфоленду или магнитную ленту. Затем ленту вводят в электронную управляющую аппаратуру испытательной машины и с помощью регулирующей системы управляют ею.

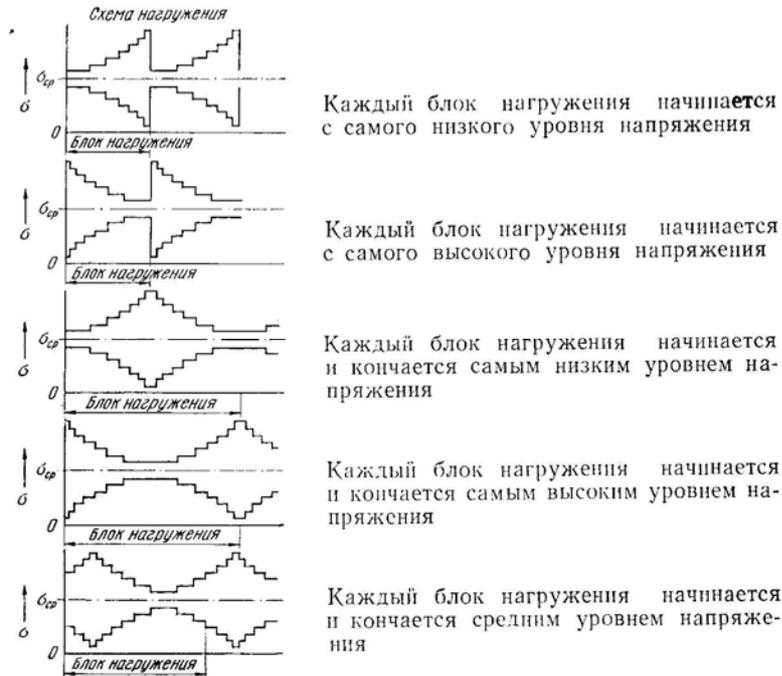


Рис. 22. Возможная последовательность при испытании с программированным нагружением

При таких испытаниях нагружение происходит в нерегулярной последовательности, в то время как при стохастически детерминированных программированных испытаниях нагружение, которое удовлетворяет нормальному распределению, осуществляют с помощью функционального генератора.

1.2.3. МАШИНЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ

Для исследования поведения материалов и деталей при циклическом нагружении находят применение различные виды испытательных машин. По виду нагружения их можно разделить на испытательные машины для циклического растяжения-сжатия, изгиба и кручения.

Другим признаком классификации испытательных машин могут быть способы получения циклических нагрузок, амплитуда колебаний, частота колебаний и цель применения.

Для циклического растяжения-сжатия применяют или машины со специальным устройством для создания колебаний, или резонансные машины. Испытательные машины первой группы в принципе устроены как гидравлические машины для испытаний на статическое растяжение и сжатие, но дополнительно снабжены пульсатором, цилиндр которого соединен с рабочим цилиндром испытательной машины.

При движении поршня пульсатора давление масла в рабочем цилиндре изменяется в определенном режиме. При этом способе нагружения вначале возможны перегрузки, поэтому для получения знакопеременных нагрузок машину снабжают своеобразным упругим элементом (сосудом высокого давления, наполненным маслом).

Недостаток этого принципа циклического нагружения состоит в том, что из-за больших колеблющихся масс испытания на этих машинах можно проводить только при относительно низких частотах (не более 3000 мин^{-1}). Этот недостаток можно преодолеть только с помощью машин, которые работают в резонансной области или вблизи нее. На рис. 23 представлена схема испытательной машины, работающей на принципе резонанса. При этом образец 1 приводят в колебательное движение с помощью движущегося эксцентрика 2, колебательного рычага 3 и вибрационной головки 4.

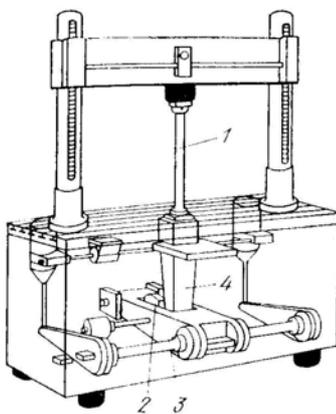


Рис. 23. Схема резонансной испытательной машины:
1 – образец; 2 – эксцентрик;
3 – колебательный рычаг;
4 – вибрационная головка

Кроме того, имеются высокочастотные пульсаторы с электромагнитным приводом, на котором с помощью электромагнитной системы можно достичь частоты нагружения до 300 Гц, а амплитуду нагрузки регулировать электронно-оптическим методом. Так как в резонансных испытательных машинах сами образцы ведут себя как пружина, их применение на стадии упругой деформации ограничено.

В последние годы в машиностроении для испытаний на усталость при частоте $0...200 \text{ Гц}$ нашла широкое применение сервогидравлическая система, ранее использовавшаяся в самолето- и ракетостроении.

На рис. 24 представлена схема подобной системы. С помощью электрогидравлического сервоклапана 3 в двойной цилиндр 4 насосом высокого давления 9 подают масло, которое вызывает требуемое нагружение образца 5. Нагрузку измеряют силоизмерителем 6 и преобразуют в электрическое напряжение усилителем 7. Полученное фактическое значение напряжения в усилителе датчика 2 сравнивается с заданным параметром, по-

ступающим от датчика 1, и разница между фактическим и заданным значениями в виде регулирующего отклонения поступает к сервоклапану.

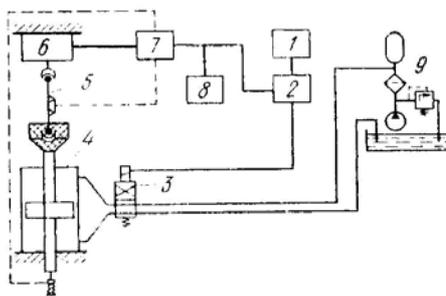


Рис. 24. Сервогидравлическая испытательная система (гидропульсационная система):

1 – датчик параметра; 2 – усилитель датчика; 3 – сервоклапан; 4 – цилиндр;
5 – образец; 6 – силоизмеритель; 7 – усилитель силоизмерителя; 8 – осциллограф; 9 – насос высокого давления

При этом все элементы 1 – 7 образуют замкнутую систему регулирования. Заданные параметры регулирования можно получить с помощью функционального генератора программирующих устройств или компьютера. При этом могут быть реализованы практически все необходимые виды нагружения. Возможно использование компьютера не только для постоянного контроля и корректировки нагружения, но и для точного учета и обработки результатов испытаний.

При использовании сервогидравлических машин с высокой скоростью регулирования можно при квазистатических испытаниях в определенных пределах изменять жесткость машин.

Недостаток сервогидравлических машин состоит в значительном потреблении энергии, большей частью превращаемой в тепло и уносимой при охлаждении.

В машинах для испытания на усталость при изгибе циклическое нагружение может осуществляться при вращении образца и без вращения. В машинах для испытаний на изгиб с вращением (рис. 25) вращающийся образец нагружается изгибающим моментом.

При испытании плоских и круглых образцов на знакопеременный или консольный изгиб образец с помощью двойного эксцентрика изгибают попеременно в обе стороны на определенный угол. Недостатком этого вида испытаний по сравнению с нагружением типа растяжение-сжатие является неоднородное распределение напряжений в поперечном сечении образцов. С помощью машин для испытаний на циклическое кручение получают знакопеременный крутящий момент, вызывающий в образце напряжения сдвига. Эти испытания находят применение, например, для определения конфигурации и эксплуатационной прочности коленчатых валов.

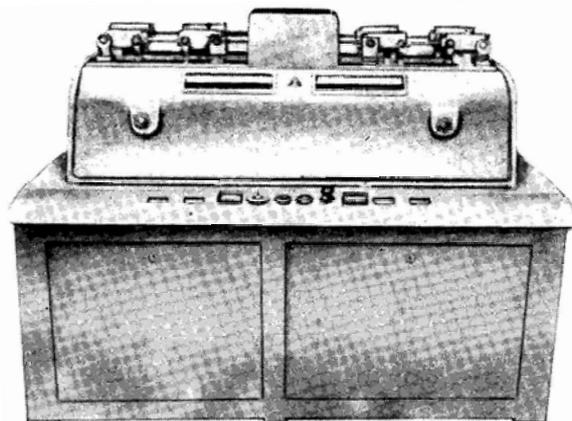


Рис. 25. Машина для усталостных испытаний на изгиб с вращением (VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig)

Для испытания деталей часто целесообразно собирать испытательное устройство по агрегатному принципу и приспосабливать его для решения той или иной задачи испытания.

При этом в качестве элементов испытательного устройства используют нагружающее приспособление, называемые испытательными цилиндрами, оборудование для создания и измерения нагрузки, а также элементы связи. Испытательный цилиндр состоит из цилиндра с притертым поршнем, который создаст циклическое нагружение по гидравлическому или сервогидравлическому принципу.

1.3. ИСПЫТАНИЯ ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

В условиях эксплуатации часто возникают ударные воздействия, например при переезде транспортных средств через выбоины, при формировании железнодорожных составов, при взлете и посадке самолетов или даже при зацеплении шестерен и зубчатых колес в приводе. Попадание в цель и взрыв снарядов, высокоскоростная обработка материалов также приводят к ударным нагрузкам различной величины. В таких случаях для

характеристики поведения материала необходимо провести испытания с использованием ударной нагрузки.

1.3.1. ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ

На рис. 26 представлены пределы различных скоростей деформации и соответствующие методы испытаний. Получаемая при продольном растяжении скорость деформации материала в пределах упругого растяжения связана со скоростью роста нагрузки равенством

$$\dot{\sigma} = \dot{\epsilon} E . \quad (1.18)$$

При скорости деформации $10^{-1} \dots 10^0 \text{ c}^{-1}$ начинается ударная нагрузка, а выше 10^2 c^{-1} – происходит распространение упругопластической волны деформации. В то же время процесс деформации постепенно приближается к адиабатическому процессу, поскольку вызываемый деформацией нагрев образца очень быстро теряет возможность компенсироваться отводом тепла в окружающее пространство. При скоростях деформации свыше 10^4 c^{-1} происходит образование ударной волны, при этом характерное для низких скоростей деформации плоское напряженное состояние переходит в плоское деформированное состояние.

Увеличение скорости деформации вызывает повышение напряжения течения. Разумеется, более существенным моментом при этом является снижение вязкости, вызывающее появление макроучастков хрупкого излома. В металлах эти участки излома можно определить по кристаллическим блестящим поверхностям разрушения, так как плоскости спайности кристаллов интенсивно отражают свет.

Плоско-напряженное состояние		Плоско-деформированное состояние	
Изотермический процесс деформации	Адиабатический процесс деформации		
Длительные испытания	Методы испытаний		Опыты со взрывом на плите
	Испытания действием статической нагрузки	Испытания с применением ударной нагрузки (опыты с ударным инструментом, со взрывом)	
Ползучесть	Характеристика ползучести процесса		Распространение взрывной волны
	Квазистатическая деформация	Переходная зона	
$10^{-8} \quad 10^{-6} \quad 10^{-4} \quad 10^{-2} \quad 10^0 \quad 10^2 \quad 10^4 \quad 10^6$			
Скорость деформации, c^{-1}			
$10^6 \quad 10^4 \quad 10^2 \quad 10^0 \quad 10^{-2} \quad 10^{-4} \quad 10^{-6} \quad 10^{-8}$			
Время на выполнение 1 % растяжения			

Рис. 26. Деление методов испытаний в зависимости от скорости деформации

В отличие от них сильно деформированные участки вязкого излома имеют матовый, волокнистый вид. Известно, что появление хрупкого разрушения является причиной многих аварий металлических конструкций судов, мостов, сосудов высокого давления и трубопроводов.

Причиной появления хрупкого излома наряду с повышенной скоростью деформации могут быть также низкие температуры и многоосное напряженное состояние (учитывая и остаточные напряжения). Образование хрупкого излома в наибольшей степени стимулирует концентрация напряжений вблизи надрезов и трещин. На рис. 27 показана температурная зависимость разрушающего напряжения гладких образцов для испытания на растяжение и образцов с нанесенными трещинами. Там же приведена температурная зависимость предела текучести и временного сопротивления при растяжении. В гладких образцах приводящее к разрушению усилие, отнесенное к фактическому поперечному сечению, уменьшается до значений предела текучести материала только при очень низких температурах; для конструкционных марок стали эта температура T_1 находится в интервале 120...70 К. В то же время на образцах с надрезом или с трещиной может быть зафиксировано очень заметное падение разрушающего напряжения при значительно более высоких температурах (кривые 1 – 3). Температура T_2 , при которой хрупкий излом может образоваться от маленькой трещины, как только номинальное напряжение образца достигнет предела текучести, называется температурой нулевой пластичности (температурой NDT). Напротив, при температуре T_3 при номинальном напряжении на уровне предела текучести дальнейшее развитие трещины невозможно; в этом случае говорят о торможении или остановке трещины.

При оценке склонности элемента конструкции к хрупкому разрушению следует не только учитывать влияние внешних параметров таких, как скорость деформации, температура и напряженное состояние, но также нужно помнить, что вязкость материала сильно зависит от его структуры и свойств, т.е. может заметно измениться в процессе изготовления и при эксплуатации деталей в результате холодной деформации (наклепа), термообработки, коррозии или воздействия излучения.

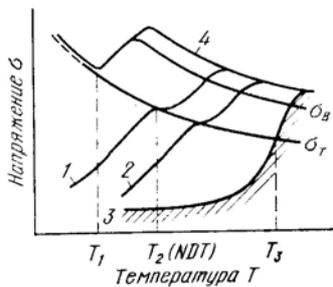


Рис. 27. Диаграмма разрушающее напряжение – температура для конструкционной стали:

1 – разрушающее напряжение для образца с небольшой трещиной; 2 – разрушающее напряжение для образца с трещиной большего размера или с остаточными напряжениями; 3 – предельная кривая для распространения очень длинной трещины (t_3 – температура остановки трещины); 4 – разрушающее напряжение для образца без надреза; NDT – температура нулевой пластичности

Поскольку процесс сварки связан с разнообразными тепловыми и механическими воздействиями, нужно особенно тщательно контролировать свойства сварных соединений в условиях ударного нагружения.

1.3.2. ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ И УДАРНОЕ СЖАТИЕ

Испытание на ударное растяжение используют для определения механических свойств (прочности и пластичности) материала при его растяжении с высокой скоростью. Для этого разработаны использующие сервогидравлический принцип быстродействующие разрывные машины, позволяющие регулировать скорость движения поршня до 10 м/с. Для более высоких скоростей деформации наряду с машинами для испытания на растяжение с пневматическим приводом применяют маятниковые и ротационные копры. Кроме того, используя испытания при нагружении взрывом, можно с помощью сжигания смеси с порохом получить высокую скорость деформации; при этом распределение нагрузки во времени варьируется в широких пределах дозировкой заряда.

Характеристикой вязкости является удельная работа удара

$$W_s = W / V, \text{ Дж/мм}^3, \quad (1.19)$$

где W – работа, затрачиваемая на удар; V – объем среднего участка образца (рис. 28, а).

С помощью омического тензометрического датчика и при использовании электронной аппаратуры можно также записать диаграммы усилие – время или усилие – удлинение. Определение относительного удлинения при разрыве на образцах, испытываемых на ударное растяжение, часто затруднено из-за образования нескольких шеек на образце. Поэтому испытания обычно проводят на образцах с надрезом, имеющим угол (γ дна надреза) 60° (рис. 28, б).

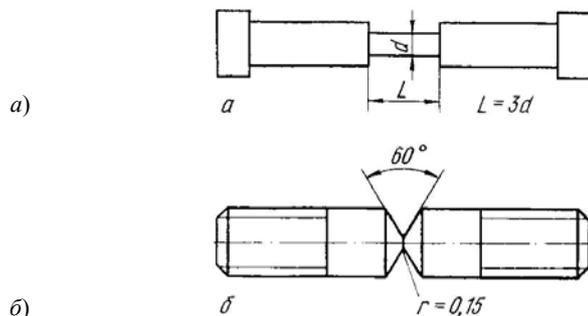


Рис. 28. Формы образцов для испытаний на ударное растяжение:

а – без надреза; б – с надрезом

Испытание на ударное сжатие редко применяют для оценки свойств материала. Для испытаний по этому методу применяют цилиндрические образцы с $L_0 = d_0$, а необходимая для получения определенного обжатия работа удара рассчитывается на весь объем образца.

1.3.3. ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНОЕ КРУЧЕНИЕ

Методы испытаний на ударное кручение целесообразно использовать для материалов, которые по характеру своей структуры или по состоянию после обработки имеют очень невысокую вязкость.

При испытании на ударный изгиб либо разрушают с помощью маятникового копра простой цилиндрический или призматический образец и определяют необходимую для этого работу удара, либо при заданной работе удара измеряют прогиб неразрушенного образца. Этот способ хорошо себя зарекомендовал на практике прежде всего для определения характеристик вязкости нежелезных сплавов (например, цинковых), литых материалов, инструментальных сталей, порошковых материалов и полимерных материалов. При испытании неэлектропроводных высокополимерных материалов можно непосредственно на образце зафиксировать момент разрушения путем нанесения слоев серебра, которые действуют как замыкающие или размыкающие контакты в электрической схеме.

Установка для испытаний на ударное кручение показана на рис. 29. При испытании один конец образца 7 захватывается кулачковой муфтой 4 с дисковым маховиком 3, в то время как другой конец образца жестко закреплен. Работу разрушения можно рассчитать с помощью фиксируемой по показаниям тахометра скорости движения маховика до и после удара.

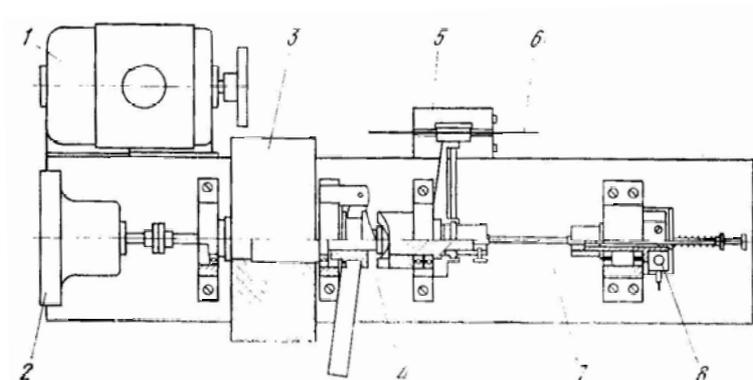


Рис. 29. Установка для испытаний на ударное кручение:

1 – электродвигатель; 2 – тахометр; 3 – дисковый маховик; 4 – кулачковая муфта;
5 – фотоэлемент; 6 – спиральная шайба; 7 – образец; 8 – медоза

Кроме этого, при установке медозы и фотоэлемента можно снять диаграмму крутящий момент – угол закручивания. Испытание на ударное кручение применяют, в частности, для контроля инструментальных сталей, используемых для спиральных сверл.

1.3.4. ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ НАДРЕЗАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Испытание на ударный изгиб имеет наибольшее значение для определения сопротивления хрупкому разрушению вязких металлических и высокополимерных материалов. Использование образцов с надрезом определяет склонность испытываемых материалов к хрупкому разрушению по следующим двум причинам: во-первых, благодаря надрезу устраняется поперечное сужение, и вместе с тем формируется объемное напряженное состояние; во-вторых, концентрация деформации в малом объеме вблизи надреза обеспечивает высокую локальную скорость деформации. Испытание на ударный изгиб образца с надрезом используется не только для определения склонности к хрупкому разрушению конструкционных сталей, но и для контроля качества обработки, однородности структурного состояния, а также, например, для исследования склонности к старению. Этот метод является самым распространенным (после испытания на растяжение) стандартным испытанием материалов в металлургическом производстве и металлообрабатывающей промышленности, что не в последнюю очередь объясняется его простотой и малым расходом материала.

1.3.4.1. Проведение испытаний. При проведении испытаний на ударный изгиб надрезанный с одной стороны образец разрушается или прогибается, насколько позволяют возможности испытательного устройства, посредством удара маятникового копра или какого-либо другого ударного приспособления. При этом образец может либо располагаться на двух опорах (по Шарпи), либо быть зажатым с одной стороны (по Изоду). Ниже рассматривается только испытание по методу Шарпи. Положение образца и схема нанесения удара показаны на рис. 30. На рис. 31 представлен вид маятникового копра.

Укрепленный на стержне молот, имеющий на своей ударной стороне фигурный вырез или боек, описывает после высвобождения дугу и в самой нижней точке траектории движения передает часть своей кинетической энергии образцу.

В первоначально предложенном Шарпи методе испытания образец с надрезом имел поперечное сечение 30×30 мм; затем было разработано и нормировано в стандартах на методы испытаний на ударную вязкость большое число образцов с надрезами других размеров. Поскольку образец с надрезом не удовлетворяет требований закона подобия Кика, можно сравнивать только те результаты испытаний, которые получены на образцах одинаковой формы.

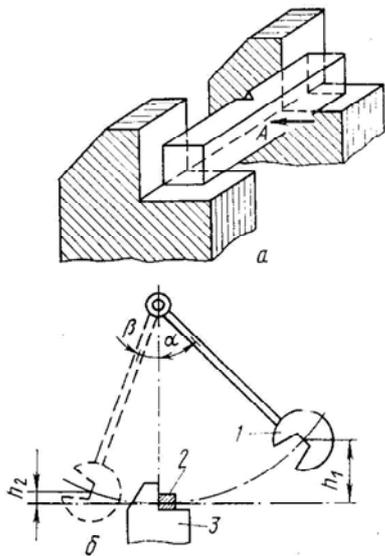


Рис. 30. Испытание на ударный изгиб образца с надрезом:
a – расположение образца; *б* – схема нанесения удара; *A* – направление удара;
l – маятниковый копер; *2* – образец; *3* – опора

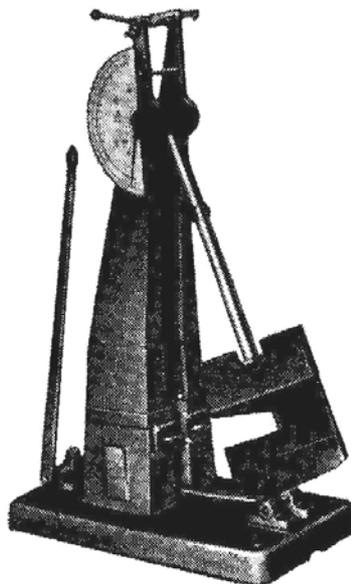


Рис. 31. Маятниковый копер (завод машин для испытания материалов, Лейпциг)

Выбор формы образца или формы надреза определяется прежде всего вязкостью испытываемого материала. При испытаниях обычных высокопрочных конструкционных сталей образцы с острым надрезом (обозначаемые так же, как V-образные образцы по Шарпи) почти полностью вытеснили образцы с круглым надрезом U-образной формы или с замковым надрезом, так как только острый надрез может обеспечить предотвращение деформации по всему надрезанному сечению. Образец для испытаний по Шнадту представляет собой нестандартный образец с острым надрезом. Он имеет наряду с "вдавленным" острым надрезом ($r < 0,005$ мм) в растягиваемой зоне в другой, противоположной надрезу, сжимаемой зоне дополнительный болт из твердого сплава, который обеспечивает дополнительное сопротивление деформации.

Для проведения испытаний образец с надрезом свободно помещают на опоры, причем смещение плоскости симметрии надреза и плоскости симметрии опор не должно превышать 0,5 мм. С таким же допустимым отклонением должен осуществляться удар маятникового груза, приходящийся по стороне образца без надреза. Скорость маятникового копра в момент соударения зависит от высоты падения:

$$V = [2gl(1 - \cos \alpha)]^{1/2} \approx (2gh)^{1/2}, \text{ м/с}, \quad (1.20)$$

где g – ускорение свободного падения; l – расстояние между центром вращения и серединой образца; α – угол падения маятникового груза; h – высота падения.

В обычных маятниковых копрах с запасом работы 150...300 Дж скорость соударения маятникового груза с образцом лежит в интервале 5...7 м/с; в ротационных копрах скорость удара может достигать 200 м/с. Для испытаний с пониженной энергией или с пониженной скоростью соударения (например для высокополимерных материалов) требуются маятниковые копры с грузом меньшей массы или с небольшой высотой падения.

В качестве характеристики вязкости определяется необходимая для разрушения образца работа W_k по разности энергий маятникового груза до и после удара. Эту работу рассчитывают по равенству

$$W_k = G(h_1 - h_2) = Gl(\cos \beta - \cos \alpha), \text{ Дж}, \quad (1.21)$$

где G – масса маятникового груза.

Стандартные маятниковые копры имеют шкалу, которая непосредственно показывает с помощью стрелки-указателя расходимую работу. В общем случае принято работу удара W_k делить на измеренную до испытаний площадь поперечного сечения образца в плоскости симметрии надреза A_0 (Дж/см²). Этот параметр

$$\alpha_k = W_k / A_0 \quad (1.22)$$

округляют до целого числа и называют ударной вязкостью. К обозначению α_k добавляется индекс, характеризующий форму образца, например $\alpha_{k/s2}$. Поскольку работа разрушения большей частью определяется по пластической деформации не всегда точно определяемого объема, в последнее время не применяют деление на поперечное сечение образца и значение ударной вязкости выражают просто в джоулях.

Наряду с ударной вязкостью для характеристики вязкости материала используют внешний вид макроизлома и угол изгиба образца. Количественная оценка излома предусматривает определение доли кристаллического излома, т.е. доли хрупкого разрушения на поверхности излома.

1.3.4.2. Диаграмма ударная вязкость – температура. Для определения склонности материала к хрупкому разрушению особое значение имеет проведение испытаний на ударный изгиб при различных температурах. Измеренные параметры представляют в виде диаграммы ударная вязкость – температура ($\alpha_k - T$). С этой целью

образцы нагревают или охлаждают и сразу же после этого разрушают. В качестве охладителей до 200 К используют ацетон с сухим льдом, а для более низких температур – смесь изопентана или пропана с жидким азотом. Для того чтобы в момент разрушения гарантировать отклонение температуры образца от заданной температуры испытаний не более ± 2 °С, предусматривают перегрев или переохлаждение образца, зависящее от разности между комнатной температурой и температурой испытаний и от времени до разрушения образца. Время выдержки образцов при температуре испытаний должно составлять минимум 10...15 мин, а время от извлечения образцов из нагревательного или охлаждающего устройства до разрушения не должно превышать пяти секунд. Для построения полноценной диаграммы $\alpha_k - T$ требуется около 30 образцов обычно на 10 значений температур приходится по три образца.

Три принципиально возможных вида кривой ударная вязкость – температура представлены на рис. 32.

Кривая 1. Зависимость ударной вязкости от температуры незначительна и материал даже в зоне низких температур еще достаточно вязок. Хрупкое разрушение может произойти только при особых условиях обработки, например после нейтронной бомбардировки. Подобное изменение свойств характерно для металлов с ГЦК-решеткой таких, как алюминий, медь, никель, аустенитные стали, а также для вязких высокополимерных материалов. В указанных случаях зачастую вообще нет необходимости проводить испытание на ударную вязкость, так как вязкость может быть в достаточной мере косвенно охарактеризована значениями относительного удлинения и сужения при испытании на растяжение.

Кривая 2. При весьма незначительной зависимости от температуры наблюдаются также очень низкие значения ударной вязкости в широком интервале температур. Подобное поведение характерно для хрупких материалов таких, как стекло, керамические материалы, высокопрочные (закаленные на мартенсит) стали. Целесообразнее определять сопротивление этих материалов ударным нагрузкам при испытаниях на ударный изгиб или ударное кручение, а также использовать методы механики разрушения.

Кривая 3. Ударная вязкость падает в относительно узком интервале температур – от высоких значений до низких. Для металлов при высоком значении ударной вязкости характерен вязкий излом, для самых низких значений ударной вязкости обычно характерно хрупкое бездеформационное разрушение. На промежуточном участке резкого падения кривой $\alpha_k - T$ наблюдается смешанное разрушение с различными долями вязкого хрупкого излома. Такой вид кривой $\alpha_k - T$ типичен для металлов с о.ц.к. или гексагональной решеткой. Промежуточный (ниспадающий) участок кривой имеет большое значение для характеристики сталей с феррито-перлитной структурой, так как даже небольшие различия в химическом составе и состоянии структуры приводят к заметному сдвигу положения и наклона этого участка (переходной зоны) от вязкого к хрупкому разрушению (рис. 33).

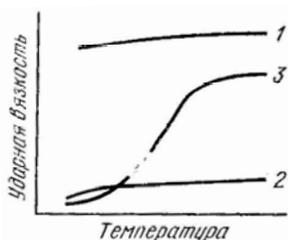


Рис. 32. Кривые ударная вязкость – температура для различных групп материалов:

- 1 – высокий уровень;
- 2 – низкий уровень;
- 3 – крутое падение

При точном построении кривых $\alpha_k - T$ в зоне падения кривой можно зафиксировать несколько перегибов, которые могут быть связаны с изменениями механизма разрушения. Учитывающие это явление предложения по определению зависящей от физических свойств материала температуры перехода к хрупкому разрушению пока еще не нашли применения в практике испытаний. Чаще используются определяемые эмпирически предельные (переходные) температуры $T_{\bar{u}}$, которые позволяют классифицировать различные материалы по их склонности к хрупкому разрушению. Надо подчеркнуть, что значения этих переходных температур нельзя рассматривать как нижний предел эксплуатационных температур для деталей машин и установок.

1.3.4.3. Испытания на ударную вязкость надрезанных образцов с регистрацией диаграммы. Определяемая при обычном испытании надрезанного образца работа удара W_k является интегральной величиной, зависящей от прочности и пластичности в соответствии с формулой

$$W_k = \int_{f=0}^{f_c} \sigma df, \quad (1.23)$$

где f – прогиб; f_c – прогиб при разрушении об-

Как показано на рис. 34, одна и та же работа удара получается при совершенно различных значениях напряжения и

По этой причине невозможно использовать ударную вязкость для определения размеров подвергающихся ударным нагрузкам.

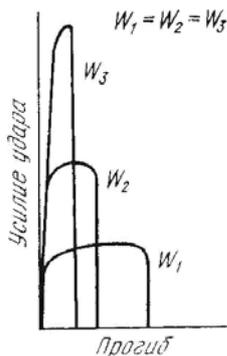


Рис. 34. Схематические кривые усилие удара – прогиб

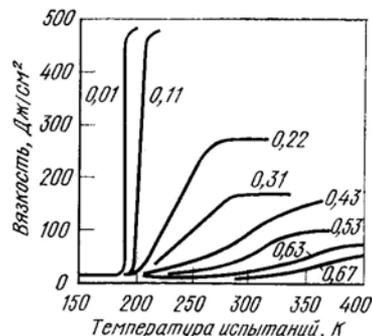


Рис. 33. Влияние содержания углерода в стали на ход кривой $\alpha_k - T$; образцы с острым надрезом (цифры на кривых соответствуют содержанию углерода, %)

раза.

та удара получается при совершенно различных значениях напряжения и

рассчитываемую по работе удара конструктивных элементов,



Рис. 35. Схема проведения испытаний на ударный изгиб с записью диаграмм разрушения

Расширение объема информации, получаемой при испытании на ударный изгиб, возможно при записи с помощью электронной аппаратуры кривых усилие удара – смещение (прогиб) или усилие удара – время в момент удара, воздействие которого длится доли секунды. Схематический порядок испытаний подобного рода представлен на рис. 35.

В данном случае усилие удара измеряется с помощью расположенного под ударным бойком пьезокварцевого датчика или с помощью укрепленного на ударном бойке оптического тензометрического датчика, в то время как прогиб образца может быть определен с помощью фотоэлемента фиксированием движения маятникового груза. Влияние температуры на вид регистрируемой диаграммы при испытании на ударный изгиб образцов с надрезом показано на рис. 36.

1.3.5. ИСПЫТАНИЯ НА ОБРАЗЦАХ, ИМИТИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИИ

Даже при регистрации диаграммы усилие удара – прогиб метод испытаний на ударный изгиб еще не в состоянии дать точную характеристику склонности конструктивных элементов к хрупкому разрушению при эксплуатационных нагрузках, и поэтому нельзя с его помощью точно определить пределы допустимых нагрузок. Это объясняется тем, что размеры конструктивного элемента сильно влияют на напряженное состояние и скорость деформации, а процесс развития трещины в больших конструкциях не может быть достаточно полно воспроизведен при испытании образца с надрезом.

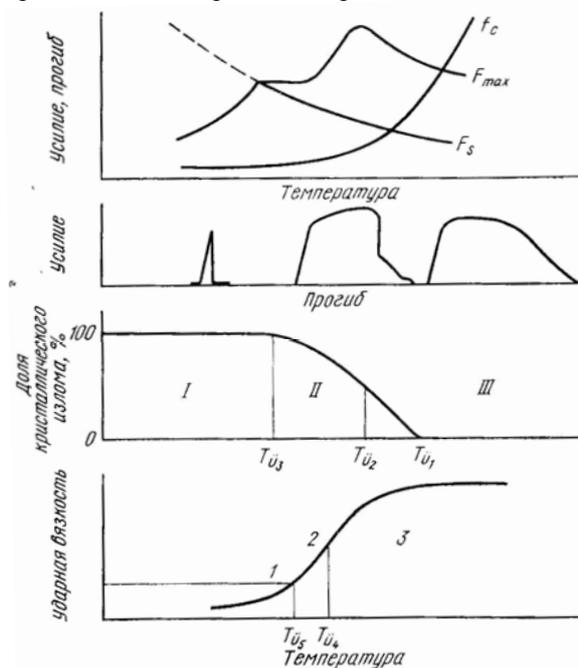


Рис. 36. Параметры, определяемые при испытании на ударный изгиб надрезанного образца с записью диаграммы разрушения в зависимости от температуры:

- F_s – усилие при переходе от упругого к упруго-пластическому состоянию;
- F_{max} – максимальное усилие при разрушении; f_c – прогиб в начале нестабильного распространения трещины; I – хрупкое разрушение; II – излом смешанного типа; III – вязкое разрушение; 1 – низкие значения вязкости; 2 – зона смешанного излома; 3 – высокие значения вязкости

Для того чтобы при определении склонности материала к хрупкому разрушению обеспечить максимально возможное приближение к характеру нагрузок в условиях эксплуатации, необходимы образцы, соответствующие

щие элементам конструкций. В зависимости от размеров образцов оказалась целесообразной следующая классификация:

- 1) образцы с острым надрезом или с предварительно нанесенной трещиной, которые по ширине соответствуют толщине листа;
- 2) образцы, ширина которых значительно больше толщины листа;
- 3) крупные образцы с размерами, соответствующими размерам конструктивных элементов (пластины);
- 4) испытания сборных конструктивных элементов или конструкций.

Использование образцов с весьма острым надрезом или с предварительно нанесенной трещиной позволяет раздельно определить энергию зарождения и энергию распространения трещины, а вместе с тем имитировать естественные трещиноподобные дефекты. Необходимый для этого надрез (радиус надреза $r < 0,005$ мм) может быть получен, например, путем «вдавливания» очень острого лезвия или с помощью нанесения усталостной трещины. Ко второй группе методов испытаний относятся испытания падающим грузом (испытание по Пеллини), которые в течение примерно 20 лет применяют для определения температуры нулевой пластичности (NDT) на стальных листах. Его преимуществом является простота проведения испытаний, малый разброс результатов измерений, а также возможность контроля листов значительной толщины. На плоский образец (длиной 130 или 360 мм, толщиной 16, 19 или 25 мм) наплавляют валик, в центре которого делают надрез шириной 1,5 мм. Вертикально падающий груз создает напряжение на образце, лежащем на двух опорах; испытания ведут при различных температурах с интервалом 5 °С. Поскольку для ограничения прогиба под образцом находится опора соответствующей формы, напряжение в образце не может превысить предел текучести, и температура, при которой развитие трещины захватывает весь образец, соответствует температуре нулевой пластичности. Схема проведения испытаний и разрушенный образец показаны на рис. 37.

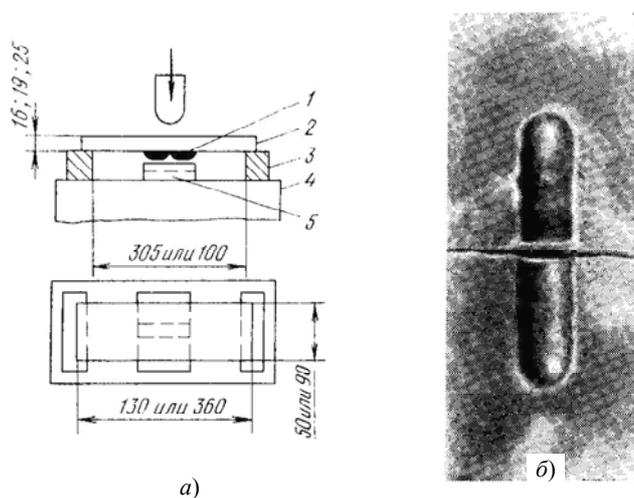


Рис. 37. Испытание падающим грузом:

a – схема проведения испытаний; 1 – наплавленный валик с надрезом;

2 – образец; 3 – опора; 4 – плита; 5 – ограничитель;

б – образец судостроительной стали после разрушения

В ряде случаев применяют взрывное испытание, при котором в листовом образце с трещиной при воспламенении заряда взрывчатого вещества создаются высокие нагрузки. Если приводящее к разрушению напряжение больше предела текучести материала, то лист коробится; если меньше, то можно наблюдать плоский излом с сильно разветвленными трещинами.

К третьей группе методов испытаний относится испытание с остановкой трещины (испытание по Робертсону, рис. 38). При проведении этого испытания стальную плиту предварительно нагружают в машине для испытания на растяжение до уровня, при котором напряжение в плите составляет 60 % от предела текучести, а на той стороне, где находится сверление с пропиленным надрезом (например, с помощью строительномонтажного пистолета), наводится трещина. В течение испытания температура образца либо постоянна по всей длине (изотермическое испытание), либо изменяется так, что температурный градиент составляет примерно 5 °С/см (испытание с температурным градиентом). При этом определяют температуру, при которой развивающаяся трещина останавливается (температура остановки трещины или температура CAT – Crack-Areest temperatur). Температура остановки трещины имеет особое значение для конструкций, в которых мелкие трещины не опасны, но должно быть достаточно надежно предотвращено быстро развивающееся хрупкое разрушение.

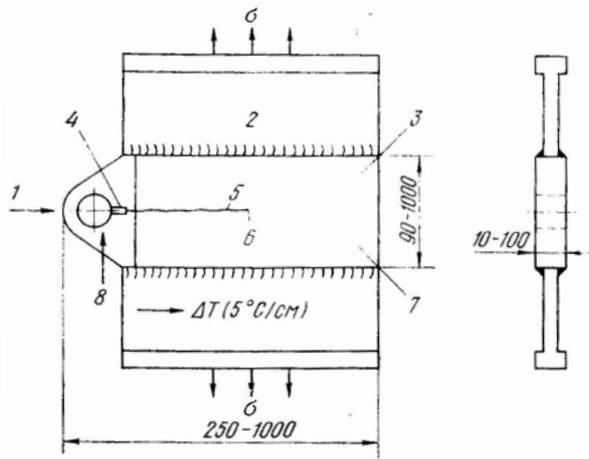


Рис. 38. Форма образца для испытания с остановкой трещины при градиенте температур:

1 – ударное нагружение; 2 – закрепленный лист; 3 – образец; 4 – надрез; 5 – трещина; 6 – остановка трещины; 7 – тепло; 8 – холод

1.3.6. ИСПЫТАНИЯ С ОСОБО ВЫСОКИМИ СКОРОСТЯМИ ДЕФОРМАЦИИ

Схема проведения испытаний материала в условиях распространения упруго-пластической волны на установке Гопкинсона показана на рис. 39. Образец расположен между двумя упругими элементами таким образом, что обеспечивается хороший акустический контакт. При воспламенении заряда взрывчатого вещества или при ударе пули образуется одномерная волна напряжения, которая частично отражается образцом, а частично проходит через него.

С помощью электронного измерительного устройства определяется в зависимости от времени падающая на образец, а также отражаемая и проходящая через него волна напряжения, а по ней рассчитывается динамическая зависимость напряжение – удлинение материала.

Еще большее увеличение скорости деформации можно получить с помощью поверхностной ударной волны в плоском образце при использовании импульсных генераторов. В настоящее время эти методы испытаний используются преимущественно при фундаментальном изучении физических свойств материала, например при исследовании динамики перемещения дислокаций или фазовых превращений, вызываемых ударной волной. Однако можно надеяться, что в будущем они также будут использованы для определения свойств материалов, которые при взрывной штамповке или в других условиях обработки (а может быть и эксплуатации) подвержены воздействию деформации с весьма большими скоростями.

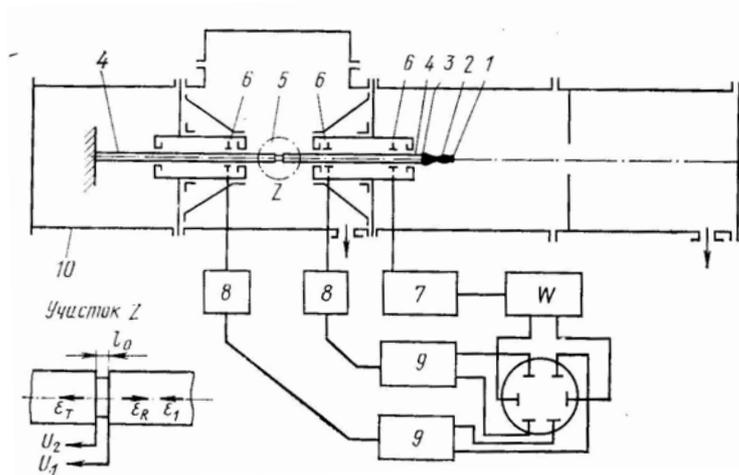


Рис. 39. Конструкция установки Гопкинсона:

1 – цилиндр; 2 – взрывчатое вещество; 3 – специальное звено;
4 – штанга Гопкинсона; 5 – образец; 6 – накопитель; 7 – пусковая система;
8 – входной усилитель; 9 – усилитель; 10 – защитный кожух

1.4. СПОСОБЫ ИСПЫТАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ

1.4.1. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Значительный прогресс в определении сопротивления материалов разрушению достигнут в последние годы благодаря разработке методов механики разрушения. Исходное положение механики разрушения заключается в том, что разрушение элементов конструкций всегда есть следствие развития трещин, которые возникли либо еще при изготовлении деталей (при сварке, шлифовке, закалке), либо во время их эксплуатации вследствие воздействия нагрузок или коррозии. Учитывая влияние этих дефектных мест как при анализе напряженного состояния конструктивных элементов, так и при определении некоторых параметров материала при испытании

ях (образцов с нанесенной трещиной) механика разрушения позволяет установить количественную связь между номинальным напряжением, формой и размером данного дефекта и сопротивлением материала стабильному и нестабильному развитию трещин. Именно в этом заключается принципиальная основа использования данных методов испытаний при выборе материала, определения размера и установления срока службы деталей машин и элементов конструкций, для которых существует опасность – быть разрушенными в процессе эксплуатации.

1.4.1.1. Некоторые положения линейной механики разрушения. При определении принципиальных связей следует исходить из представленной на рис. 40 модели растянутой изотропной бесконечной пластины конечной толщины, которая имеет внутреннюю трещину с радиусом закругления, стремящимся к нулю. Если допустить линейную связь между напряжениями и удлинением, то для описания поля напряжений в непосредственной близости от конца трещины можно использовать, следующие комплексные функции напряжений:

$$\sigma_x = \frac{\sigma(\pi a)^{1/2}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\varphi}{2} \left[1 - \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2} \right]; \quad (1.24a)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma(\pi a)^{1/2}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\varphi}{2} \left[1 - \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2} \right]; \quad (1.24б)$$

$$\sigma_z = \mu(\sigma_x - \sigma_y); \quad (1.24в)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma(\pi a)^{1/2}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2}, \quad (1.24г)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Указанные равенства не относятся к случаю, когда $r = 0$, так как при этом получается не имеющий физического смысла результат, выражающийся в бесконечно большом напряжении. В зависимости от толщины пластины в зоне конца трещины образуются различные виды многоосного напряжения. При большой толщине пластин имеет место преимущественно плоское деформированное состояние, т.е. отсутствует поперечная деформация в направлении z . Образующееся при небольшой толщине пластины плоское напряженное состояние характеризуется условием $\sigma_z = 0$.

Сумма компонент напряжения в равенствах (1.24а) – (1.24г) определяется по формуле

$$K = \sigma(\pi a)^{1/2}. \quad (1.25a)$$

Не зависящая от положения в полярных координатах r и φ величина K описывает интенсивность поля напряжений в зоне конца (вершины) трещины и по Ирвину обозначается как коэффициент интенсивности напряжения с размерностью $\text{Н/мм}^{3/2}$.

При учете типа возможного смещения поверхностей трещины (рис. 41) различают коэффициенты интенсивности напряжений K_I , K_{II} , K_{III} . Поскольку I тип раскрытия трещин под действием растягивающей нагрузки имеет наибольшее значение при практических случаях нагружения, в дальнейшем его следует рассматривать как основной.

Кроме того, следует учитывать, что размеры конструктивного элемента всегда конечны. С этой целью необходимо ввести поправочный коэффициент f , который отражает влияние геометрии элемента конструкции и трещины:

$$K_I = \sigma(\pi a f)^{1/2}. \quad (1.25б)$$

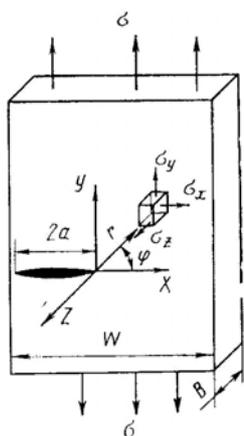


Рис. 40. Растягиваемая пластина с внутренней трещиной

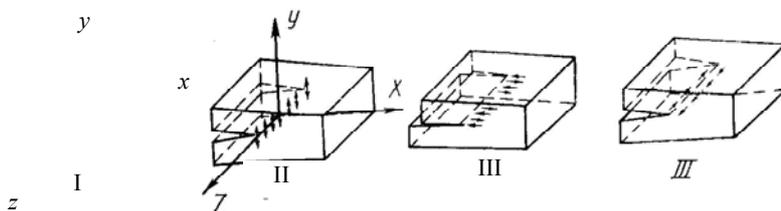


Рис. 41. Типы взаимного смещения поверхностей трещины:

I – растягивающие напряжения действуют трещины и способствуют взаимному раскрытию

II – напряжения сдвига действуют

(поперечный сдвиг); III – напряжения сдвига фронту трещины (продольный сдвиг)

Практическое значение коэффициента количественной оценки процессов что в качестве критерия нестабильного разрушения) принимается момент параметра K_c (плоское напряженное деформированное состояние), фиксируемый

перпендикулярно плоскостям поверхностей (плоское растяжение); перпендикулярно фронту трещины действуют параллельно

интенсивности напряжения K_I для разрушения заключается в том, развития трещин (хрупкое достижение критического состояние) или K_{Ic} (плоское при непрерывном возрастании

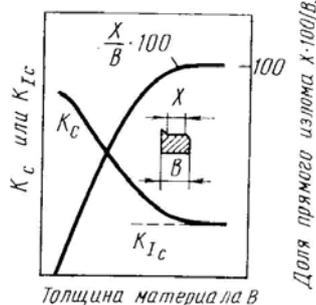


Рис. 42. Зависимость вязкости разрушения от толщины материала

растягивающего усилия. Эти параметры, характеризующие склонность материала к разрушению в зависимости от имеющегося напряженного состояния, обозначаются как вязкость разрушения и определяются величинами, получаемыми при проведении испытания. В условиях плоского напряженного состояния K_{Ic} зависит еще от толщины образца, в то время как K_{Ic} является константой материала, которая определяет нижний предел вязкости материала при его разрушении (рис. 42). Определяемая в условиях плоского деформированного состояния вязкость разрушения K_{Ic} зависит не от формы образца и его размеров и не от номинального напряжения и размеров трещины, а от состояния структуры данного материала, температуры окружающей среды и скорости деформации. Из рис. 42 следует, что для реализации плоского деформированного состояния необходима определенная толщина образца B . Критерием является соотношение

$$B \geq 2,5 (K_{Ic} / \sigma_n)^2, \quad (1.26)$$

где σ_n – физический или условный ($\sigma_{0,2}$) предел текучести.

Кроме того, для оценки материала можно также использовать вид макроизлома. В то время как при разрушении в условиях плоского деформированного состояния преобладает доля плоского излома, при плоском напряженном состоянии разрушение происходит преимущественно в плоскости среза.

Сформулированные выше положения в соответствии с ЛМР применимы только при условии, что размеры конструктивного элемента или образца значительно больше, чем величина пластической зоны перед концом (вершиной) трещины. При выполнении этого условия фактическая длина трещины a и радиус пластической зоны r суммируются, в результате получается эффективная длина трещины

$$a_{\text{эф}} \leq a + r_s. \quad (1.27)$$

По Ирвину, радиус пластической зоны r при $\varphi = 0$ и $\sigma_y = \sigma_x$ (см. рис. 40) из формулы (1.24б) равен

$$r_s = 1/2a (\sigma / \sigma_T)^2 \quad (1.28)$$

или после подстановки (1.28) и (1.25б)

$$r_s = K_I^2 / 2\pi\sigma_T^2. \quad (1.29a)$$

Если учесть далее, что внутри образца в зоне конца трещины образуется плоское деформированное состояние, а в близких к поверхности областях устанавливается плоское напряженное состояние, то получается модель пластической зоны по Макклинтоку–Ирвину (рис. 43).

Для плоского напряженного состояния действительно равенство (1.29а), плоское деформированное состояние описывается формулой

$$r_s = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_T^2} (1 - 2\mu)^2. \quad (1.29б)$$

Если предположить, что вне эффективной длины трещины материал нагружен только в области упругих деформаций, то после подстановки эффективной длины трещины в равенство (1.29б) получается модифицированная форма уравнения для определения интенсивности напряжения:

$$K_I = \sigma [\pi (a - r_s)]^{1/2} \quad (1.30)$$

или

$$K_I = \sigma \left\{ \pi a \left[1 - \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (1.31)$$

Эти формулы действительны при пластической зоне должны быть существенно меньше, чем размеры детали или образца.

1.4.1.2. Нелинейная механика раскрытия трещины). В том случае, выполняется, разрушению предшествует объем материала перед концом преобладает в большинстве материалов, при обычных условиях эксплуатации например, очень низкие температуры или ЛМР преобразуется в нелинейную механику разрушения при общей Исходным теоретическим положением модель трещины для упруго-пластической которой положены следующие предпо-

1. На концах трещины образуются

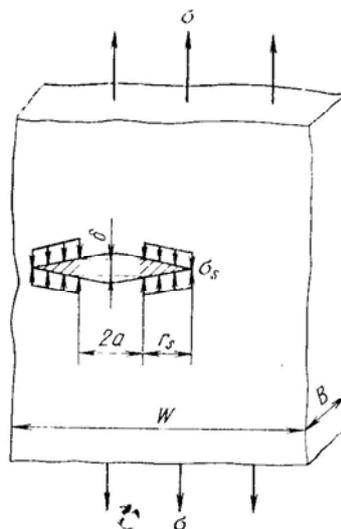


Рис. 44. Модель трещины по Дагдейлу

условию $\sigma / \sigma_T < 0,6$. Размеры вено меньше по сравнению с

разрушения (критическое если последнее условие не пластическое течение в большом трещины. Поскольку этот случай используемых в конструкциях, (исключением являются, большая толщина материала) механику разрушения, т.е. в пластической деформации. является предложенная Дагдейлом деформации (рис. 44), в основу ссылки: пластические зоны длиной r_s ,

которые сначала не приводят к увеличению трещины. Вне гипотетической трещины длиной $2(a + r_s)$ материал пластичен.

2. Материал внутри пластической зоны длиной r_s находится под действием равномерного напряжения течения σ_T .

3. Длина пластической зоны r_s устанавливается таким образом, чтобы на концах гипотетической трещины $2(a + r_s)$ не образовывалось напряжений больших σ_T .

Расширение пластически деформируемого участка близ конца трещины при увеличении внешнего напряжения связано с раскрытием трещины δ (мм). Для случая плоского напряженного состояния

$$\sigma = \frac{8\sigma_T a}{\pi E} \ln \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_T}\right)} \quad (1.32)$$

с приближением, относящимся к $\sigma/\sigma_T < 0,6$:

$$\delta = \pi\sigma^2 a / E\sigma_T. \quad (1.33)$$

В качестве критерия нестабильного распространения трещины после пластической деформации принимается (аналогично критическому коэффициенту интенсивности напряжения в ЛМР) величина критического раскрытия трещины в зоне у вершины трещины, обозначаемая δ_c . Это критическое раскрытие трещины δ_c в НЛМР принимается в качестве параметра вязкости. Названный параметр связан с критическим коэффициентом интенсивности напряжения K_c плоско-напряженного состояния:

$$K_c = (\sigma_T \delta_c E)^{1/2}. \quad (1.34)$$

1.4.1.3. Механика разрушения при стабильном развитии трещины. Критический размер дефекта, приводящий к разрушению элемента конструкции, часто может быть достигнут при стабильном развитии имеющейся трещины. Особое значение при этом имеет рост трещины в условиях переменных нагрузок или коррозионного растрескивания. Рост трещины, происходящий при коррозионном растрескивании, т.е. под влиянием коррозионной среды внутренних или внешних растягивающих напряжений, также в решающей степени определяется величиной коэффициента интенсивности напряжения вблизи вершины трещины. Минимальная начальная величина K , приводящая в данных условиях к началу стабильного роста трещины с последующим разрушением, обозначается для случая плоского деформированного состояния K_{Isc} , а для плоского напряженного состояния – K_{sc} . При этом следует обращать внимание на то, что $K_{Isc} < K_{Ic}$ и $K_{sc} < K_c$.

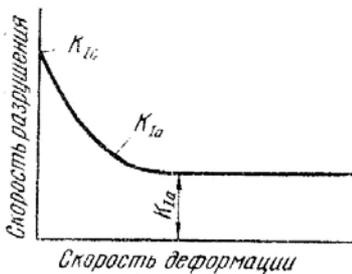


Рис. 45. Зависимость вязкости разрушения от скорости деформации

1.4.1.4. Механика разрушения при динамическом развитии трещины. Все сказанное до сих пор относилось к началу нестабильного или стабильного роста первоначально неразвивающейся трещины при приложении статической нагрузки. Если обозначить полученные при повышенных скоростях деформации (рис. 45) параметры как динамическую вязкость разрушения K_{Id} , а ее минимальную величину – как вязкость при остановке трещины K_{Ia} , то

$$K_{Id}, K_{Ia} < K_{Ic}. \quad (1.35)$$

Это условие должно быть учтено в расчетах во избежание внезапного хрупкого разрушения, которое может возникнуть при ударных нагрузках или при распространении движущихся трещин (разрыв хрупкого включения, развитие сварочных трещин, имеющих в зоне термического влияния, в глубь основного материала, развитие трещин в газопроводах).

1.4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ K_{Ic}

Получаемая в соответствии с ЛМР связь между вязкостью разрушения K_{Ic} , внешней нагрузкой и критической длиной трещины является исходным пунктом для экспериментального определения вязкости разрушения.

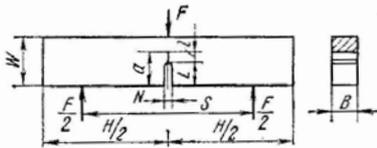
Поскольку применение линейной механики разрушений ограничено условием, что опасные трещины будут развиваться в условиях упругой деформации, с целью получения достоверных результатов испытаний разработаны следующие рекомендации:

1. Размеры образцов при любых условиях испытания должны быть значительно больше, чем протяженность пластической зоны вершины трещины.
2. При проведении испытаний необходимо точно фиксировать нагрузку образца и критическую длину трещины к началу нестабильного роста трещины.
3. Для данной формы образца должно быть известно уравнение, определяющее связь между коэффициентом интенсивности напряжения, нагрузкой и длиной трещины.

1.4.2.1. Форма и размеры применяемых образцов. Форма и размеры обычно используемого образца для испытаний на трехточечный изгиб и компактного образца для испытаний на растяжение показаны в табл. 2.

2. Образец для испытания на трехточечный изгиб (по RS3642–72)

Форма образца



Уравнения	Размеры
$K_1 = F_s / BW^{3/2} [2,9(a/W)^{1/2} - 4,6(a/W)^{3/2} + 21,8(a/W)^{5/2} - 37,6(a/W)^{7/2} + 37,8(a/W)^{9/2}]$ $K_1 = \frac{F_s}{BW^{3/2}} f(a/W)$	$W = 2B \quad s = 8B \quad H = 9B \quad L = 0,8B \quad a = (0,9 \dots 1,10) B \quad N = B / 8l \text{ не менее } 1,25 \text{ мм}$

Компактные образцы на растяжение при равной величине B характеризуются меньшим расходом материала. Преимущество образцов на трехточечный изгиб заключается в меньших усилиях при испытании. Размеры образца определяются в зависимости от выбранной или требуемой толщины B , которая, в соответствии с формулой (1.26), должна обеспечить развитие трещины в условиях плоского деформированного состояния. Поскольку оценка необходимой толщины образца по формуле (1.26) возможна только при известных вязкости разрушения и пределе текучести σ_T исследуемого материала, необходимо сначала определить отношение σ_T к модулю упругости E для установления минимальной толщины образца B (по RS 3642–72):

$100\sigma_T / E$	B_{\min} , мм	$100 \sigma_T / E$	B_{\min} , мм
0,50...0,57	75	0,71...0,75	32
0,57...0,62	63	0,75...0,80	25
0,62...0,65	50	0,80...0,85	20
0,65...0,68	44	0,85...1,00	12,5
0,68...0,71	38	1,00 и более	6,5

Образцы для испытаний в соответствии с механикой разрушения наряду с выполненным с помощью механических методов обработки надрезом имеют еще усталостную трещину, образующуюся при переменной нагрузке (например, на специальных вибраторах). Различие между образцом для трехточечного изгиба и компактным образцом на растяжение заключается только в том, что эффективная длина надреза L и трещины a отсчитывается в компактном образце не от поверхности, а от места приложения нагрузки.

1.4.2.2. Наведение усталостной трещины. Наведение усталостной трещины осуществляется при циклическом изгибающем переменном нагружении образца с надрезом. При этом следует обращать внимание на то, что при большой амплитуде напряжений не может быть сохранена необходимая острота надреза, в то время как малая амплитуда напряжений может привести к большому числу циклов нагружения и в результате этого к структурным изменениям материала в зоне вершины трещины.

Поэтому необходимо определить развивающуюся при переменных нагрузках в зоне вершины трещины максимальную интенсивность напряжений:

$$K_{f\max} \leq 0,006E. \quad (1.36)$$

Расчет $K_{f\max}$ производят с помощью формул, приведенных в [2]; при этом усилием F считают действующую при циклическом нагружении максимальную нагрузку F_{\max} . Минимальная нагрузка F_{\min} может быть определена из соотношения

$$F_{\min} / F_{\max} = 0,1 \dots 0,25.$$

1.4.2.3. Проведение испытаний и обработка результатов. Схема проведения испытаний показана на рис. 46. Изменение формы образца и начало нестабильного роста трещины фиксируются при измерении раскрытия надреза. Для этого применяют оборудованный полупроводниковым тензометрическим датчиком прибор для фиксации раскрытия, который устанавливают либо на специально обработанную кромку по краю надреза, либо на привинчиваемые ножи. В процессе испытаний с помощью двухкоординатного самописца записывается усилие F и соответствующее раскрытие надреза V .

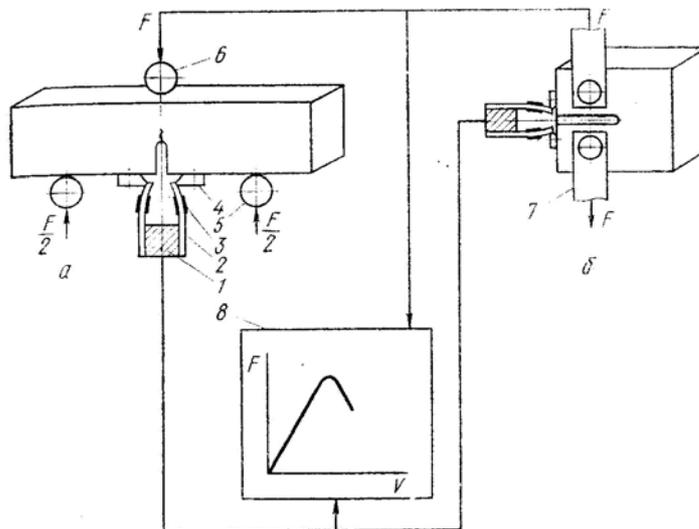


Рис. 46. Проведение испытаний:

a – образец для испытаний на трехточечный изгиб; *б* – компактный образец на растяжение; 1 – дистанционный блок устройства для фиксации раскрытия; 2 – плоская пружина; 3 – полупроводниковый тензометрический датчик; 4 – нож; 5 – опора; 6 – пуансон; 7 – растягивающая подвеска; 8 – двухкоординатный самописец

В зависимости от нагрузки, конкретного состояния могут быть нагрузка – раскрытие (рис. 47).

Тип 1. Процесс испытания характеризуется при критической нагрузке F_Q , в

максимальному усилию, приводит к

Тип 2. После упругого поведения

чекской нагрузки F_Q можно отметить

скачкообразного удлинения трещины

Тип 3. Требования ЛМР

материала не соблюдаются при более

высоких нагрузках в результате

пластической деформации. В зависи-

мости от доли пластической деформации

в общем процессе формоизменения

корректное определение величины

K_{Ic} по нагрузке F_Q возможно только

при следующих контрольных условиях.

После проведения касательной *OA*, которая

соответствует упругой деформации, строят

секущую *OB*, имеющую наклон на 5 %

меньший, чем касательная *OA*. Кривая

нагрузка – раскрытие и секущая пересекаются

в точке критической нагрузки F_Q , которая

отвечает величине подрастания трещины

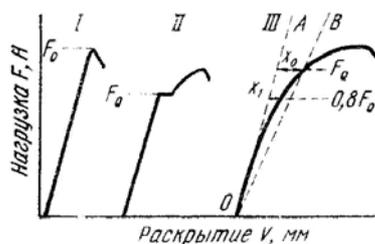


Рис. 47. Типы кривых нагрузка – раскрытие и определение вязкости разрушения

марки материала и его зафиксированы три типа диаграмм

теризуется упругим поведением

нестабильное развитие трещины

данном случае соответствующей

разрушению образца.

материала при достижении крити-

отчетливую нестабильность

является следствием

на определенную величину.

относительно упругого поведения

на определенную величину.

$$x_1 \leq 0,25x_0. \quad (1.37)$$

Величина K_Q , характеризующая в данном случае вязкость разрушения, рассчитывается по параметру F_Q для образцов при испытании на трехточечный изгиб или компактных образцов при испытании на растяжение.

В результате для образцов на трехточечный изгиб

$$K_Q = \frac{F_Q s}{BW^{1/2}} f(a/W), \quad (1.38)$$

а для компактных образцов

$$K_Q = \frac{F_Q}{BW^{1/2}} f(a/W). \quad (1.39)$$

Зависящая от длины трещины a и ширины образца W величина, учитывающая геометрический фактор $f(a/W)$, определяется по таблицам. Из формул (1.38) и (1.39) видно, что наряду с критической нагрузкой F_Q необходимо также знать размеры образца и длину трещины a , которая определяется как сумма для надреза и усталостной трещины и после проведения испытаний измеряется в трех точках поверхности излома образца (рис. 48).

Если расчетная величина K_Q удовлетворяет сформированному в соответствии с зависимостью (1.26) требованию для нестабильного развития

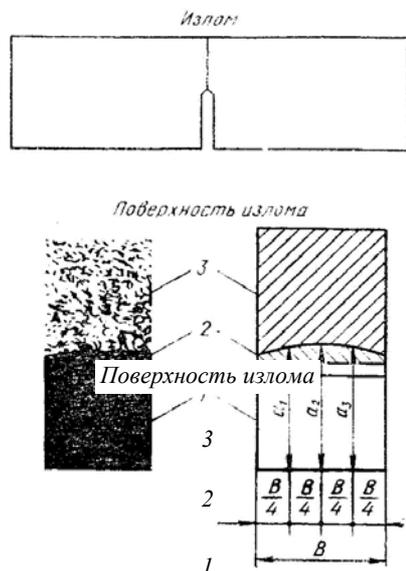


Рис. 48. Определение длины трещины на поверхности излома образца:

1 – механический надрез;

2 – усталостная трещина; 3 – излом при статическом нагружении

трещины в условиях плоского деформированного состояния, т.е. если

$$B \geq 2,5(K_Q / \sigma_T)^2, \quad (1.40)$$

то величина K_{Ic} может считаться удовлетворительной для данного материала.

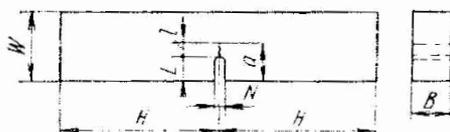
1.4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИНЫ δ_c

Экспериментальное определение критического раскрытия трещины δ_c осуществляется аналогично проведению испытаний в соответствии с требованиями ЛМР. Размеры обычно используемых образцов для испытания на трехточечный изгиб могут быть определены по табл. 3. При расчете толщины образца B необходимо исходить из соответствующей толщины материала (например, толщины листа). Из приведенных в табл. 3 образцов рекомендуется тип I. Для выращивания (наведения) усталостных трещин необходимые в случае испытания образцов на трехточечный изгиб параметры максимальной нагрузки F_0 определяют по следующим формулам:

$$K_{f \max} < 0,63\sigma_T B^{1/2}; \quad (1.41)$$

$$K_{f \max} = F_{OY} / BW^{1/2}. \quad (1.42)$$

3. Размеры образцов для испытаний на изгиб при определении δ_c (по RS4450–74)



Размеры	Типы образцов		
	I	II	III
B	Толщина материала		
W	$2B$	B	$1,3B$
a	B		$0,3B$
L	Для $B \geq 13$ мм не более ($a - 2,5$ мм) Для $B < 13$ мм не более ($a - 1,75$ мм)		
H	$2W - 5$ мм		
N	$< 1,5$ мм при $W < 25$ мм $> 1,16$ мм при $W > 25$ мм		
l	Не менее 1,25 мм		

K -тарировка Y приведена на рис. 49, а соответствующая минимальная нагрузка F_{\min} определяется по рекомендуемому соотношению $F_{\min} / F_{\max} = 0,1 \dots 0,25$. Образцы с усталостной трещиной подвергают действию нагрузки при статическом испытании на изгиб; при этом с помощью устройства, фиксирующего перемещение, измеряют раскрытие надреза на поверхности образца. Необходимая чувствительность составляет 20 мВ на 1 мм раскрытия надреза при 80...100-кратном усилении.

В зависимости от материала, состояния его обработки и условий испытаний (температуры окружающей среды) могут быть зафиксированы три типа кривых нагрузка – раскрытие (рис. 50).

Тип I. Разрушение происходит при критической нагрузке F_c после четко выраженной пластической деформации без предварительного стабильного роста трещины. Определение критического раскрытия трещины δ_c осуществляется по раскрытию надреза V_c , измеряемому при нагрузке F_c .

Тип II. После четко выраженной пластической деформации регистрируется первый скачок трещины при F_c . Получающееся при F_c раскрытие надреза используют для определения δ_c .

Тип III. Устанавливаемое после четко выраженной пластической деформации при нагрузке F_a стабильное развитие трещины по достижении максимальной нагрузки F_{\max} приводит к разрушению образца. Для экспериментального определения начала стабильного развития трещины внутри образца необходимо применять неразрушающие методы исследования, например акустическую эмиссию, ультразвуковые методы, измерение электрического сопротивления.

Величина вязкости, определяемая в этих условиях только как условное критическое раскрытие трещины δ_a или δ_{\max} , может быть рассчитана по V_a или по раскрытию надреза V_{\max} , соответствующему максимальной нагрузке F_{\max} .

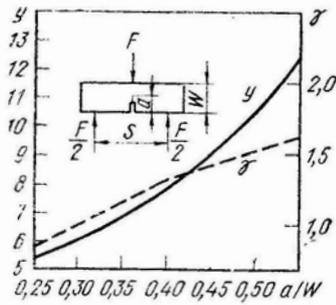


Рис. 49. К-тарировка γ и константа γ в зависимости от a/W для $s/W = 4:1$

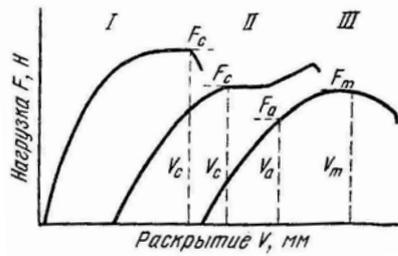
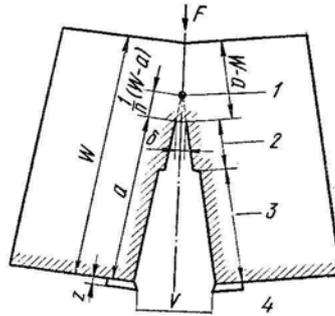


Рис. 50. Типы кривых нагрузка – раскрытие и определение критического раскрытия трещины

Рис. 51. Геометрия раскрытия трещины в образце при испытании на трехточечный изгиб:

- 1 – центр вращения;
- 2 – усталостная трещина;
- 3 – механический надрез; 4 – нож



Расчет критического раскрытия трещины может быть выполнен двумя методами: в соответствии с теоретическими предпосылками и при условии, что при раскрытии трещины ее кромки остаются плоскими (рис. 51).

$$\delta_c = \frac{0,45(W-a)}{0,45W + 0,55a + z} \left[V_c - \frac{\sigma_T \gamma W (1-\mu^2)}{E} \right], \quad (1.43)$$

если

$$V_c \geq \frac{2\gamma\sigma_T W (1-\mu^2)}{E}, \quad (1.44)$$

и

$$\delta_c = \frac{0,45(W-a)}{0,45W + 0,55a + z} \left[\frac{V_c^2 E}{4\gamma\sigma_T W (1-\mu^2)} \right], \quad (1.45)$$

если

$$V_c < \frac{2\gamma\sigma_T W (1-\mu^2)}{E}, \quad (1.46)$$

где γ – константа (см. рис. 49); z – расстояние от устройства, фиксирующего раскрытие надреза, до поверхности образца.

Если подставить значения

$$\gamma = \frac{V_{el} E}{\sigma_T W (1-\mu^2)}, \quad (1.47)$$

где V_{el} – предельная величина упругого раскрытия трещины, и

$$M = \frac{0,45(W-a)}{0,45W + 0,55a + z} \quad (1.48)$$

в формулы (1.43) и (1.45), то получится

$$\delta_c = M (V_c - V_{el}), \quad \text{если } V_c \geq 2V_{el}, \quad (1.49)$$

и

$$V_c = M \frac{V_c^2}{4V_{el}}, \quad \text{если } V_c < 2V_{el}. \quad (1.50)$$

Когда можно определить только "условное критическое раскрытие трещины" δ_a или δ_T , то в формулы (1.49) и (1.50) следует вместо V_c подставить величину V_a или V_m .

Дальнейшее расчетное определение критических параметров раскрытия трещины по измеряемому на поверхности образца раскрытию надреза осуществляется по формулам, которые могут быть выведены в соответ-

ствии с представленной геометрией раскрытия трещины.

Для параметра δ_c , относящегося к глубинным участкам усталостной трещины в момент нестабильного развития трещины, при условии $B \leq 50$ мм и в интервале $0,06 \leq \delta_c \leq 0,6$ мм имеет место следующее равенство:

$$\sigma_c = \frac{V_c}{1 + n \left(\frac{a+z}{W-a} \right)} \quad (1.51a)$$

или

$$\sigma_{a,m} = \frac{V_{a,m}}{1 + n \left(\frac{a+z}{W-a} \right)}. \quad (1.51b)$$

Участок $(W-a)/n$ определяет положение центра вращения в образце в зоне конца трещины. Параметр n в большинстве случаев равен 3.

1.4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ И РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИНЫ

Для определения вязкости разрушения при динамическом нагружении особое значение придается испытанию на ударный изгиб надрезанного образца с записью диаграммы разрушения. Его преимуществом является возможность использования обычных образцов для испытания на ударную вязкость, так как, в соответствии с формулой (1.26), вследствие более высокого динамического предела текучести значительно снижается требуемая толщина образца. Разумеется, имеет смысл нанести дополнительно на надрезанный образец усталостную трещину, чтобы получить нестабильное развитие трещины в условиях плоского деформированного состояния.

Если диаграмма сила удара – прогиб, определенная при осциллографировании испытания на ударный изгиб образца с надрезом, имеет вследствие упругого поведения материала линейную зависимость до разрушающей нагрузки F_{\max} , то можно рассчитать вязкость разрушения с помощью приведенной формулы коэффициента интенсивности напряжения образца на трехточечный изгиб:

$$K_{Ia} = \frac{F_{\max} s}{BW^{1/2}} f(a/W). \quad (1.52)$$

Для определения критического раскрытия трещины δ_{cd} при динамическом нагружении существуют две возможности: одна из них реализуется при проведении описанного выше испытания на ударный изгиб с записью диаграммы разрушения, а вторая – при использовании образца с двойным надрезом по методу Канацава (рис. 52).

При испытании обычного надрезанного образца на ударный изгиб величину σ_{cd} определяют по формуле

$$\sigma_{cd} = 0,5(W-a) \frac{\pi}{180} \alpha, \quad (1.53)$$

где W – ширина образца; a – длина трещины; α – угол изгиба, $\text{tg} \alpha = 2fc/s$ (s – расстояние между опорами маятникового копра).

Образец с двойным надрезом (по Канацава) имеет размеры обычных образцов для испытания на ударную вязкость, но сделанные в нем два надреза и две усталостные трещины равномерно удалены от центра образца и находятся на определенном расстоянии h друг от друга. Последнее должно быть достаточно большим, чтобы во время деформации образца не происходило никакого взаимного влияния зон под каждым надрезом. При нагружении оба надреза находятся в одинаково напряженном состоянии и одинаково подвержены деформации, в результате чего каждый из двух надрезов имеет равное раскрытие трещины к началу нестабильного ее развития. После разрушения образца в зоне конца усталостной трещины неразрушенного надреза можно измерить под микроскопом величину критического раскрытия трещины.

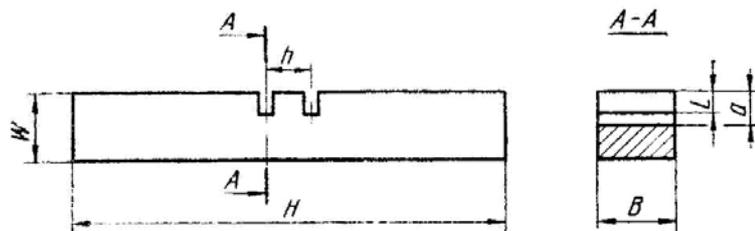


Рис. 52. Образец с двойным надрезом по Канацава

1.4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Величина K_{Isc} и скорость стабильного распространения трещины, обусловленная коррозионной средой, оп-

ределяются на надрезанных образцах для испытаний на коррозионное растрескивание с дополнительно нанесенной усталостной трещиной. Поскольку величина коэффициента интенсивности напряжений вблизи конца трещины является решающей для скорости развития трещины, а следовательно, и для стойкости образца, рассчитывается параметр K_{Ic} в зависимости от внешней нагрузки, длины трещины и геометрии образца. Кроме того, экспериментально определяется стойкость, которая увеличивается при уменьшении величины K_{Ic} , а при уменьшении скорости развития трещины до нуля стремится к бесконечности.

Соответствующий параметр интенсивности напряжений обозначается K_{Isc} (рис. 53).

В часто используемой установке Брауна надрезанный с одной стороны образец с помощью рычага нагружается постоянным во времени изгибающим моментом; при этом скорость развития трещины может быть определена по отклонению плеча рычага (рис. 54). Для данного случая нагрузки величина коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} определяется по формуле

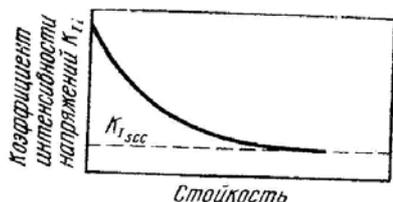


Рис. 53. Зависимость стойкости образца от интенсивности напряжений при испытании на коррозионное растрескивание

$$K_{Ii} = \frac{4,12 M (\alpha^{-3} - \alpha^3)^{1/2}}{BW^{1/2}},$$

где M – изгибающий момент; B – толщина образца; W – ширина образца; $\alpha = -a / W$; a – длина трещины.

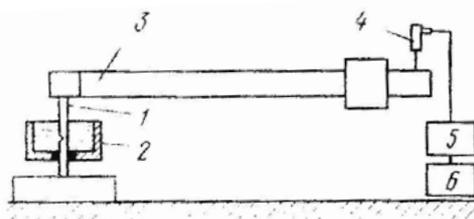


Рис. 54. Схема установки для измерения стабильного роста трещин в коррозионной среде:

1 – образец; 2 – ванночка с электролитом; 3 – плечо рычага, 4 – индуктивный датчик перемещения; 5 – усилитель; 6 – самописец

Использование в качестве (ДКБ-образца) (рис. 55) дает заключающееся в том, что для дополнительных устройств. Нагрузку помощью одного винта, Коэффициент интенсивности длины трещины a , геометрии образца по формуле

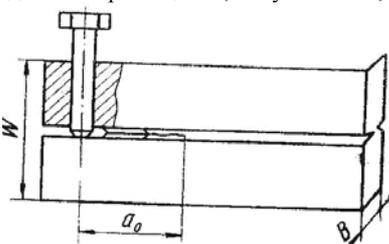


Рис. 55. ДКБ-образец для испытаний при нагружении винтом

образца двухконсольной балки существенное преимущество, испытаний не требуется никаких на образец осуществляют с действующего на обе консоли. напряжений K_{Ii} ; в зависимости от и раскрытия надреза определяется

$$K_{Ii} = \frac{VEW [3W(a + a_0)^2 + W]^{1/2}}{4[(a + a_0)^3 + W^2 a]}, \quad (1.55)$$

где V – вызываемое нажимным усилием винта раскрытие надреза, измеряемое относительно оси винта; E – модуль упругости; W – ширина образца; a_0 – длина трещины к началу испытаний.

Если коррозионная среда вызывает удлинение трещины, то величина K_I уменьшается настолько, что трещина останавливается и скорость роста трещины становится неизмеримо малой. Определяемая по равенству (1.55) величина K_{Isc} относится к длине этой трещины a .

Аналогично условиям ЛМР здесь также необходимо для соблюдения состояния плоской деформации выполнение требования

$$B \geq 2,5(K_{Isc} / \sigma_t)^2. \quad (1.56)$$

Если это требование не выполняется, то получают величину K_{sc} , зависящую от толщины образца, т.е. необходимо учитывать пластическую зону.

1.4.6. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДВИЖЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Экспериментальное определение скорости роста трещины в зависимости от циклического коэффициента интенсивности напряжения ΔK проводится на описанных в образцах, при этом нанесение усталостной трещины может быть использовано для количественной оценки материала. Относительно простой и часто используемый метод слежения за растущей трещиной заключается в наблюдении за фронтом трещины с помощью микроскопа. Регистрация роста трещины может быть осуществлена с помощью ультразвуковых методов и методов магнитной индукции. Еще одна возможность исследования заключается в анализе поверхности излома образца или детали, подвергавшейся переменной нагрузке. При электронно-микроскопическом исследовании бороздок, об-

разующихся на II стадии развития трещины, можно определить прирост длины трещины при циклическом нагружении непосредственно по расстоянию между бороздками. Этот метод можно также использовать для исследования и выяснения причин выхода деталей из строя.

1.4.7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Преимуществом определяемых в соответствии с ЛМР и НЛМР параметров вязкости разрушения является установление количественной связи между вязкостью материала, номинальным напряжением и размером дефекта. Знание этих величин позволяет установить допустимое внешнее номинальное напряжение или допустимую величину дефекта при расчетах конструкций и контроле. Существенной предпосылкой использования механики разрушения для количественной оценки надежности является наряду с необходимостью определения параметров вязкости разрушения знание коэффициентов интенсивности напряжений в зависимости от геометрии деталей и трещин. Они определяются методами теории упругости при анализе распределения напряжений в элементах конструкций, причем для решения плоских и пространственных задач предпочтительнее использовать численные методы. Для расчета коэффициентов интенсивности напряжений при нелинейном поведении материала особенно хорошо подходят методы конечных элементов.

В табл. 4 представлено несколько критериев разрушения, которые в настоящее время используют преимущественно для определения допустимых размеров дефектов в толстостенных сосудах высокого давления и во вращающихся массивных деталях, таких как рабочие колеса турбин, прокатные валки и валы. Важной областью использования механики разрушения является оценка надежности сопротивления разрушению сварных конструкций из высокопрочных материалов, так как зачастую неизбежные трещины или трещиноподобные дефекты (поры, строчки шлаковых включений, непровары) могут привести к хрупкому разрушению даже при очень низких номинальных напряжениях.

Поскольку между структурой (тонким строением) и параметрами механики разрушения существует прямая физическая связь, можно найти новые более дифференцированные и очень эффективные характеристики поведения материалов. По этой причине механика разрушения во все возрастающем объеме используется для оценки качества материала и оптимизации механических свойств строительных сталей повышенной прочности и высокопрочных машиностроительных сталей, цветных и легких металлов, инструментальных сталей, твердых сплавов, керамических и полимерных материалов.

4. Характер нагружения и определяемые при различных испытаниях параметры механики разрушения

Принципы механики разрушения	Нагружение	Параметры механики разрушения	Параметры, получаемые при испытании материала	Оценка материала
ЛМР	Статическое (без влияния среды)	K_1	$< K_{1c}$ $\geq K_{1c}$	Надежный Склонный к хрупкому разрушению
	Статическое (при воздействии среды)	K_1	$< K_{1sc}$ $\geq K_{1sc}$	Надежный Склонный к разрушению из-за развития трещины вследствие коррозионного растрескивания
	Переменное	ΔK	$< K_0$ $\geq K_0$	Надежный Склонный к разрушению из-за развития усталостной трещины
	Ударное	K_1	$< K_{1d}$ $\geq K_{1d}$	Надежный Склонный к хрупкому разрушению
НЛМР	Статическое	δ	$< \delta_c$ $\geq \delta_c$	Надежный Склонный к хрупкому разрушению
	Ударное	δ	$< \delta_{cd}$ $\geq \delta_{cd}$	Надежный Склонный к хрупкому разрушению

1. Что такое ползучесть?
2. Как проводятся испытания на длительную прочность?
3. Для чего проводятся испытания на воздействие циклических нагрузок?
4. Как проводят испытания на ударную вязкость и как оценивается результат испытаний?

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

2.1. ПОНЯТИЕ ТВЕРДОСТИ

Понятие "твердость" широко распространено и часто применяется в повседневной жизни. Различают твердые и мягкие вещества без определения или численного выражения твердости. В технике наиболее часто понятие "твердость" определяют как сопротивление, оказываемое телом при внедрении в него другого, более твердого тела. Герц попытался дать понятию "твердость" физически более точный смысл и определил ее как предельную нагрузку, которая еще не вызывает остаточной деформации материала. Однако точное определение подобных величин твердости связано с большими трудностями и они не смогли утвердиться в технике.

Испытание на твердость относится к наиболее часто используемым методам механических испытаний материалов, поскольку, с одной стороны, с его помощью можно определить (с известными ограничениями и большими оговорками) количественные связи с иными свойствами или поведением материала при определенных нагрузках; с другой стороны, процесс определения твердости требует относительно больших затрат. Тем не менее нужно иметь в виду, что здесь речь идет только о сравнительных измерениях; непосредственное заключение об эксплуатационных характеристиках материала возможно лишь в случае подбора для узких конкретных условий эмпирических коэффициентов.

Было разработано большое количество методов измерения твердости, которые обычно основываются на том, что в испытуемый материал вдавливают индентор, и образующуюся при этом пластическую и (или) упругую деформацию рассматривают как меру твердости материала.

Первая шкала твердости была составлена Моосом в 1822 г.:

Минерал	Твердость по Моосу
Тальк $Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$	1
Гипс $CaSO_4 \times 2H_2O$	2
Известковый шпат $CaCO_3$	3
Плавниковый шпат CaF_2	4
Апатит $Ca_5(PO_4)_3(F, Cl)$	5
Полевой шпат $KAlSi_3O_8$	6
Кварц SiO_2	7
Топаз $Al_2SiO_4(F, OH)$	8
Корунд Al_2O_3	9
Алмаз C	10

В этом эмпирически подобранном ряду каждым последующим минералом можно нанести царапину на поверхность предыдущего. Характеристику твердости по Моосу еще и сегодня широко применяют в минералогии.

Однако для измерения твердости металлов (как и всех технических материалов) этот способ не подходит, потому что разрыв между отдельными ступенями твердости относительно велик и неравномерен.

Наиболее употребительные в технике методы определения твердости различаются по типу нагружения индентора при внедрении его в материал. Большинство этих способов первоначально было разработано для испытания металлов. Несмотря на то что определение твердости других групп материалов (например, полимеров) этими способами принципиально возможно, целесообразно привести в соответствие методы измерения твердости со специфическими свойствами вариантов определения твердости.

2.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Методы измерения твердости при статическом нагружении отличаются друг от друга формой индентора (шарик, пирамида, конус), его материалом (закаленная сталь, твердый сплав, алмаз) и величиной приложенной нагрузки (измерение макротвердости, твердости при малых нагрузках и микротвердости), а также способом выражения характеристик твердости.

Определение твердости в макроскопической области, т.е. с применением больших усилий при испытании ($F > 30$ Н), который выбирают в качестве параметра макротвердости, характерного для структуры в целом. К испытаниям такого рода относятся способы определения твердости по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу, а также некоторые специальные методы измерения твердости при вдавливании шарика. Нагрузки в последнем случае находятся в интервале 2...20 Н. Этот метод используют преимущественно для испытаний мелких деталей, тонких слоев и материалов с низкой твердостью. При определении микротвердости и использованием небольших и малых нагрузок (до 2 Н) удастся получить характеристики твердости в специфических областях. Поскольку получаемые отпечатки очень малы, можно при использовании победных методов провести локальное измерение твердости. Например, можно измерить твердость отдельных кристаллитов или включений, а также описать изменение твердости в ликвидационных зонах или в зоне диффузии.

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ

При определении твердости по Бринеллю шарик в течение установленного времени вдавливается с определенной силой F в испытываемый образец. В результате на поверхности образца образуется отпечаток в виде полусферы диаметром d и глубиной h . Твердость по Бринеллю НВ рассчитывают как отношение приложенной нагрузки F к поверхности A образовавшегося отпечатка (без указания размерности):

$$\text{НВ} = 0,102F / A ,$$

где F – приложенная нагрузка; A – поверхность сферической лунки, мм².

Поверхность отпечатка A (мм²) определяют по уравнению

$$A = \pi Dh,$$

где D – диаметр шарика, мм; h – глубина отпечатка, мм.

Коэффициент 0,102 введен для того, чтобы величина твердости не изменилась при переводе в международную систему единиц СИ.

Однако в процессе определения твердости фиксируется не глубина внедрения шарика h , а диаметр отпечатка d . По равенству

$$h = \frac{D - (D^2 - d^2)^{1/2}}{2}$$

можно рассчитать глубину внедрения h и получить таким образом формулу твердости по Бринеллю НВ:

$$\text{НВ} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi D (D - (D^2 - d^2)^{1/2})}$$

Используемые в качестве индентора шарики из закаленной стали или твердого сплава диаметр $D = 10; 5; 2,5; 1,25$ и 1 мм. Диаметр отпечатка d должен укладываться в интервал $(0,2 \dots 0,7)D$. Чтобы не выходить за эти пределы, необходимо изменять нагрузку, величину которой можно определить по таблице. Испытание материалов и использованием шариков различной величины следует проводить при постоянном отношении F / D^2 . Величины твердости, определенные с использованием шариков различного диаметра, даже при одинаковой величине этого соотношения можно сравнивать друг с другом только с определенными оговорками.

Условия испытания влияют на полученные результаты. Поэтому необходимо задать эти условия, чтобы параметры твердости можно было сравнивать, и воспроизводить их. Например:

Величина твердости	120
Обозначение твердости по Бринеллю	НВ
Диаметр шарика, мм	5
Усилие F (Н), умножение на коэффициент 0,102	250
Длительность нагружения, с	30

Стандартными условиями испытаний являются нагрузка 29 420 Н ($29\,420 \times 0,102 = 3000$) и длительность нагружения 10...15 с. Поверхность образцов следует подготовить так, чтобы диаметр образующего отпечатка можно было точно измерить. Образец должен иметь такую толщину, чтобы отпечаток не вызывал на обратной его стороне, контактирующий с подставкой, сколько-нибудь заметной деформации. Минимальная толщина образца S_{\min} (мм) зависит от твердости материала и условий проведения испытаний. В диапазоне измерения твердости до НВ 450 справедливо равенство

$$S_{\min} = 17 \times 0,102F / \pi D \text{ НВ.}$$

Расстояние между центром отпечатка и краем образца должно составлять не меньше $2,5d$ (для железа и его сплавов, меди и медных сплавов) и $3d$ для легких металлов. В противном случае возможно искажение величины твердости из-за смещения материала на краю образца. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков для железа и его сплавов, меди и медных сплавов должно не менее чем в четыре раза, а для легких сплавов в шесть раз превышать средний диаметр отпечатка. Диаметр образующегося отпечатка следует измерять в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определять среднее двух измерений. В анизотропных материалах размеры взаимно перпендикулярных диаметров отпечатка могут отличаться друг от друга. Используемый для определения величины твердости диаметр отпечатка должен быть рассчитан как среднее минимум двух отпечатков.

Твердость испытываемого материала не должна превышать НВ 450, поскольку в противном случае деформация шарика не позволяет провести точные измерения. Если в качестве индентора используют не закаленную сталь, а твердый сплав, то начиная с твердости, равной НВ 350, получают завышенные значения. При твердости НВ 450 максимальное отклонение составляет ~2 %, поэтому в интервале НВ 350...450 не рекомендуется использовать шарики из твердого сплава.

Для определения твердости по Бринеллю при повышенных температурах (до ~700 К) используют специальное устройство. Для более равномерного и быстрого прогрева образца рекомендуется использовать ванночки с жидкостью (до 500 К – с маслом, для более высоких температур – с расплавами солей). Температура испытаний не должна отклоняться больше чем на ± 3 °С. Диаметр шарика и прикладываемая нагрузка аналогичны используемым при комнатной температуре с той лишь разницей, что шарик должен быть выполнен из жаропрочной, устойчивой против отпуска стали. Нагрузку следует плавно и равномерно повышать и конечное значение нагрузки выдерживать в течение 3 мин. При испытании материалов, текучесть которых за это время нагрузки выдерживать в течение 3 мин. При испытании материалов, текучесть которых за это время нагрузки и отметить это в протоколе испытания. Диаметр отпечатка рассчитывают обычным образом после охлаждения образца до комнатной температуры. Для материалов, свойства которых изменяются во времени при температуре испытаний (например, вследствие процессов выделения), горячие испытания пригодны только в тех случаях, когда материал перед этим подвергается отпуску и приводится в относительно стабильное структурное состояние при температуре испытаний.

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ

Определение твердости по Виккерсу осуществляют таким же образом, как и по Бринеллю. Различие заключается в том, что в качестве индентора используют алмаз, в связи с чем появляется возможность испытывать даже самые твердые материалы, используемые в технике. Кроме того, оказалось целесообразным применять в качестве индентора не шарик, а четырехгранную пирамиду с углом при вершине 136° . Такой же угол образуют касательные, проведенные к шарiku (или шаровому отпечатку) при испытаниях по Бринеллю, если $d = 0,375D$. Это соотношение находится в интервале, придерживаться которого целесообразно и при испытании твердости по Бринеллю; величины твердости до НВ 300, определенные по Виккерсу, совпадают с величинами твердости, определенными по Бринеллю.

Твердость по Виккерсу HV, как и твердость по Бринеллю, определяется отношением приложенной нагрузки F к поверхности A образующегося отпечатка и является безразмерной величиной:

$$HV = 0,102F / A ,$$

где F – приложенная нагрузка, Н; A – поверхность отпечатка, мм²;

$$A = \frac{d^2}{2 \cos 22^\circ} = \frac{d^2}{2 \sin 136^\circ / 2} = \frac{d^2}{1,854} ,$$

где d – длина диагоналей, мм.

В результате получается выражение

$$HV = \frac{0,102F \times 1,854}{d^2} = \frac{0,189F}{d^2} .$$

Поскольку, строго говоря, поверхность отпечатка по Виккерсу часто не имеет формы квадрата, для расчета твердости используют среднее значение двух диагоналей. При определении твердости по Виккерсу приложенная нагрузка заметно меньше, чем при определении твердости по Бринеллю. Наиболее предпочтительны нагрузки 49, 98, 196, 294, 490 и 980 Н. В стандартном случае применяют нагрузку 294 Н.

Краткое обозначение складывается из следующих символов: индекса HV; величины приложенной нагрузки F в ньютонах, умноженной на коэффициент 0,102; указываемой через черточку длительность нагружения в секундах (например, 50...20 HV). Сама величина твердости ставится перед индексом. Если нагрузка составляет 294 Н, а продолжительность ее воздействия 10...15 с, то приводят только индекс HV.

При использовании меньших нагрузок получается менее глубокий отпечаток, что позволяет применять образцы меньшей толщины и использовать этот метод для определения твердости относительно тонких поверхностных слоев.

2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ

При определении твердости по Бринеллю и Виккерсу требуется измерить величину получаемого в каждом случае отпечатка и по ней рассчитать величину твердости, используя значения приложенной нагрузки. Операцию вычисления можно ускорить с помощью таблиц и других подсобных средств, однако испытания в целом остаются все еще довольно трудоемким процессом, который едва ли можно автоматизировать. Именно этим объясняется то, что метод определения твердости по Роквеллу в кратчайший срок стал наиболее часто используемым на практике методом измерения твердости.

При определении твердости по Роквеллу индентор вдавливаются в испытываемый материал и глубина вдавливания t служит мерой твердости. Определение параметра твердости сводится, таким образом, к определению глубины вдавливания, поэтому само испытание проводится значительно быстрее и весь процесс измерения твердости может быть автоматизирован без больших затрат.

Но если рассматривать глубину вдавливания как непосредственную характеристику твердости, то получается, что мягкие материалы, благодаря большой глубине вдавливания, имеют высокую твердость, а твердые материалы, соответственно, низкую твердость. Но поскольку по Бринеллю и Виккерсу для твердых материалов установлены высокие, а для мягких материалов низкие значения твердости, то при определении твердости по

Роквеллу выбирают какую-либо реперную точку и полученную величину глубины вдавливания t_b вычитают из произвольно выбранной максимальной глубины вдавливания t_{\max} :

$$HR = t_{\max} - t_b.$$

Для того чтобы исключить влияние шероховатости поверхности и ошибок, получающихся из-за локальных повреждений или сложной конфигурации образца (в большинстве случаев для определения глубины вдавливания используют стрелочные индикаторы), общую нагрузку прикладывают в два приема, в виде предварительной и основной нагрузок.

В соответствии с этим принципом индентор сначала при предварительной нагрузке F_0 вдавливается в испытуемый материал на глубину t_0 . От этой реперной точки t_0 определяется уровень отсчета для измерения получающейся при определении твердости глубины вдавливания t_0 . При наложении основной нагрузки F_1 в течение 2...8 с индентор вдавливается в материал на общую глубину t_1 . Продолжительность процесса вдавливания при суммарной нагрузке $F_0 + F_1$ зависит от ползучести испытываемого материала. В общем случае она составляет:

- 2...3 с – для материалов с не зависящей от времени пластической деформацией;
- 6...8 с – для материалов с зависящей от времени пластической деформацией;
- 20...30 с – для материалов с существенно зависящей от времени пластической деформацией.

По истечении времени вдавливания основную нагрузку F_1 снимают, измеряют полученную глубину вдавливания t_b и по ней в соответствии с формулой рассчитывают твердость по Роквеллу. Большинство цифровых шкал стрелочных индикаторов, используемых для определения остаточной глубины вдавливания, рассчитано на непосредственное считывание величин твердости, так что отпадает необходимость проведения арифметических расчетов. При нанесении поля допусков на цифровую шкалу можно произвести быструю сортировку исследуемых материалов, а при соединении с электронными приборами, осуществляющими такую сортировку, процесс испытаний может быть легко автоматизирован.

Для определения твердости по Роквеллу используют несколько вариантов этого метода. При изменении твердости по Роквеллу наиболее часто используют метод С. Получаемая величина твердости указывается перед индексом использованного метода, например 47 HRC.

При измерении необходимо помнить, что величина твердости должна представлять собой среднее арифметическое не менее трех отдельных измерений. При определении твердости по Роквеллу методом С расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее 4 мм, расстояние центра отпечатков от края образца – не менее 3 мм. Испытуемый материал должен иметь достаточную толщину, чтобы отпечаток не вызывал на обратной стороне образца никакой видимой деформации. Для этого толщина испытываемого образца должна быть не менее, чем в восемь раз больше глубины вдавливания t_b . В общем случае поверхность образца, подвергаемая испытанию на твердость, должна быть плоской. При контроле цилиндрических образцов индентор вдавливается глубже, чем при испытании плоских образцов той же твердости, поэтому величина твердости получается заниженной.

Точный расчет величины твердости по Роквеллу на значения твердости, полученные другими методами испытаний, невозможен; для отдельных групп – при тщательном проведении сравнительных исследований.

2.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ВДАВЛИВАНИЕМ ШАРИКА

В то время, как металлы при комнатной температуре обычно имеют малую зависимость форм изменения от времени, у полимеров это свойство выражено гораздо сильнее. К тому же доля упругих деформаций у этой группы материалов значительно больше, поэтому определение величины твердости исключительно с помощью оценки остающегося отпечатка, да еще, как правило, при кратковременном воздействии нагрузки имело бы мало смысла.

При испытании полимерных материалов хорошо зарекомендовал себя метод определения твердости вдавливанием шарика (обозначаемый как НК) с использованием в качестве индентора шарика диаметром 5 мм. Аналогично определению твердости по Бринеллю и Виккерсу величину твердости НК рассчитывают как отношение приложенной нагрузки F к поверхности A полусферы, образующейся при вдавливании шарика. Поскольку возникает необходимость измерять упругую деформацию, приходится определять поверхность полусферы под воздействием нагрузки F . Для таких условий она может быть рассчитана по формуле при измерении глубины вдавливания шарика. Чтобы тщательным образом исключить влияние шероховатости поверхности при измерении глубины вдавливания h , используют, как и при испытании твердости по Роквеллу, предварительное нагружение силой F_0 . Величина этой нагрузки зависит от используемого прибора и составляет 4,9 Н для приборов, в которых глубину вдавливания измеряют от поверхности индентора, и 9,8 Н – для приборов, в которых глубину вдавливания измеряют от опорного столика, затем прикладывают в пределах $0,13 < h < 0,36$ см. Для того чтобы можно было выполнить эти требования, основная нагрузка F_1 варьируется и величина ее составляет 49; 132,5; 960 Н. Если оговоренные условия выполняются при нескольких значениях F_1 , то следует брать минимальную нагрузку. Твердость, определяемую вдавливанием шарика, рассчитывают по формуле

$$НК = 0,102F_1 / D\pi h,$$

где F_1 – основная нагрузка, Н; D – диаметр шарика (обычно 0 см); h – глубина вдавливания, см.

2.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПРИ МАЛЫХ НАГРУЗКАХ, МИКРОТВЕРДОСТЬ

Определение твердости при малой отгрузке отличается от методов определения макротвердости только величиной прикладываемой нагрузки, которая в большинстве случаев находится в пределах 2...20 Н. Основная область использования этого метода – измерение твердости мелких деталей и тонких слоев (например, после цементации или азотирования стали). Кроме этого, данный способ применяют для испытания материалов с низкой твердостью (например, свинца, алюминия, олова).

Измерения твердости при малой нагрузке можно проводить на стандартных приборах для испытания твердости по Бринеллю и Виккерсу. При испытании по Бринеллю используют шарик диаметром 1 мм; необходимое при этом усилие определяют по таблице, а величину твердости рассчитывают по формуле. При испытаниях с использованием малой нагрузки в качестве индентора обычно применяют пирамиду Виккерса. Величину твердости при этом рассчитывают по формуле, измеряя длину диагоналей и приложенную нагрузку. В интервале макротвердости значения HV в первом приближении не зависят от приложенной нагрузки; при усилиях же меньше 10 Н величина нагрузки при малой нагрузке, путем экстраполяции определять значения макротвердости, то можно сравнивать только те данные, которые были определены при одинаковой нагрузке. При определении твердости по Кнупу в качестве индентора используют алмазную пирамиду с ромбическим основанием. Угол пересечения выступающих продольных ребер этой пирамиды составляет $172^{\circ}30'$, а поперечных 130° . Благодаря этому получается отпечаток, продольная диагональ которого примерно в семь раз больше, чем поперечная. Продольную диагональ можно измерить относительно точно. В отличие от значений твердости по Бринеллю и Виккерсу величина твердости по Кнупу Hh рассчитывается как соотношение нагрузки F к проекции поверхности отпечатка по формуле

$$Hh = 100F / 7,02Sd^2.$$

Глубина вдавливания очень маленькая ($\sim 1/30$ продольной диагонали d). Благодаря такой малой глубине вдавливания метод определения твердости по Кнупу наиболее пригоден для измерения твердости тонких слоев (например, гальванических покрытий).

В общем случае при определении макротвердости и при измерении твердости и использованием малой нагрузки получают отпечатки на сравнительно большом участке поверхности, соответствующие средним значениям твердости, на которые влияет большое число отдельных зерен. Если необходимо узнать твердость отдельных структурных составляющих, то приложенную нагрузку уменьшают, чтобы получаемый отпечаток относился только к исследуемой структурной составляющей. Поэтому при измерении микротвердости прикладывают нагрузку в пределах 0,002...2 Н, а в качестве индентора обычно применяют пирамиду Виккерса. Ее помещают в сверление фронтальной линзы микроскопа; при этом окружающая кольцеобразная часть линзы остается свободной, что вполне достаточно с помощью пружинной системы; для получения наибольшей точности измерения следует давать как можно большую нагрузку. Верхний предел ее определяется прежде всего величиной исследуемой структурной составляющей, поскольку она должна в несколько раз превышать размер отпечатка. Это требование, в частности, относится к испытанию твердых частиц в мягкой массе основы, так как в противном случае большие по сравнению с размером твердых частиц отпечатки продавливают их. При измерении твердых частиц поверхностных слоев толщина их должна в 10 раз превышать глубину вдавливания или в полтора раза длину продольной диагонали.

2.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Наряду с методами измерения твердости при статическом нагружении хорошо зарекомендовали себя такие методы, в которых индентор воздействует на испытываемую поверхность, падая с определенной высоты, и под действием ударной нагрузки. При этом твердость можно определить либо по высоте отскока индентора, либо по размеру получаемого отпечатка. На этой основе различается упруго-динамический метод (определение твердости методом упругого отскока) и пластико-динамический метод (определение твердости методом удара).

Приборы для определения твердости методом удара удобны, они имеют малый размер, легко транспортируются, что позволяет доставить их к испытываемому объекту и проводить испытания в самых разнообразных условиях (на материальном складе, на строительном или монтажном участке), а также испытывать большие заготовки и полуфабрикаты, не вырезая специальных образцов или темплетов, вследствие меньшей по сравнению со статическими методами испытаний точности этот метод находит применение и при проверке равномерности свойств.

2.9. УПРУГО-ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Когда используемый для этих способов индентор (называемый обычно бойком) – шарик или определенной формы алмазная игла – падает с заданной высоты на поверхность испытываемого материала, он отскакивает от нее. Под действием почти остроконечного бояка расходуется часть энергии падения, так что при отскоке боек не достигает первоначальной высоты. Высота отскока тем больше, чем меньше доля пластической деформации материала. Основной областью применения этого метода является испытание крупных заготовок на равномерность поверхностной твердости. Поскольку при соударении бояка с поверхностью, как правило, не образуется заметного отпечатка, можно проводить испытания также на окончательно обработанных методом шлифовки деталях, например на поверхности бочек валков холодной прокатки. Если приходится сравнивать определяемые с помощью этого метода величины твердости на различных материалах, то следует учесть, что такое сравнение имеет смысл только в том случае, если материалы имеют примерно одинаковые модули упругости.

Самым известным испытательным прибором является склероскоп Шора. В качестве индентора применяют боек массой ~2 г с закругленной алмазной иглой. Величиной твердости является высота отскока, и по шкале с произвольно нанесенными делениями в 100 единиц можно непосредственно считывать значения твердости. Поскольку испытательные приборы часто различаются по массе молоточка, форме бойка и иглы, а также по высоте падения, необходимо всегда наряду с величиной твердости, определяемой по высоте отскока, указывать используемый прибор. Разумеется, прибор такого типа можно использовать для испытаний только в том случае, если измерения проводят на горизонтальной поверхности заготовки. При использовании маятникового молота принцип отскока распространяется также на испытания вертикальных поверхностей. Величина твердости в таких приборах выражается величиной угла отскока маятника. Преимущество этого способа заключается в том, что исключается неконтролируемое при падении влияние трения в направляющих.

2.10. ПЛАСТИКО-ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД

При проведении измерений такого типа индентор, чаще всего шарик, воздействует на испытываемый материал в условиях ударно действующей нагрузки, поэтому на поверхности материала остается отпечаток. При использовании молотка Баумана шарик прижимается к материалу под действием пружины, а величина твердости определяется размером отпечатка. Пересчетные таблицы, полученные при многочисленных сравнительных испытаниях, позволяют выразить результаты испытаний в значениях НВ. Условия проведения испытаний – диаметр шарика (5 или 10 мм), полное или половинное натяжение пружины – зависят от твердости испытываемого материала.

Таким же удобным способом измерения твердости является метод Польди. При ударе молотком по установленному на испытываемом материале короткому цилиндрическому стержню шарик производит отпечаток в материале. Но в отличие от молотка Баумана в этом случае неизвестна величина силы, применяемая при получении отпечатка. По этой причине используется эталонный стержень с известной твердостью, в котором при ударе молотком также образуется отпечаток. По величине диаметров обоих отпечатков (d_1 в эталоне, d_2 в материале) и по известному параметру НВ эталонного стержня H_1 можно определить величину твердости исследуемого материала:

$$H_2 = H_1 \frac{D - (D - d_1)}{D - (D - d_2)},$$

где D – диаметр шарика, мм.

При отсортировке перепутанных материалов или при предварительной разбраковке часто вполне достаточно установить, тверже или мягче испытываемый материал эталонного стержня; в этом случае диаметр отпечатка в материале должен быть соответственно меньше или больше. В этих случаях метод Польди вполне применим.

2.11. ПРОЧИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

Описанные выше методы измерения твердости используют главным образом для испытания металлов и полимерных материалов. Наряду с этим для испытания неметаллических образцов находят применение ряд других способов, использующих иные возможности определения параметров твердости.

Определение твердости методом царапания сапфировой иглой. Для определения твердости окончательно обработанных поверхностей материалов из дерева и слоистых прессованных материалов используется принцип, предложенный Мартенсом и основанный на том, что на поверхность испытываемого материала наносят царапины с помощью сапфировой иглы конусной формы (угол при вершине 50° , радиус иглы 25 мкм). Мерой величины твердости при нанесении царапины является нагрузка, которая образует бороздку шириной 50 мкм. Диапазон изменения нагрузки 0,5...1,5 Н.

Определение твердости по Шору (вариант D). Этот метод используют при испытании на твердость эбонита. В качестве индентора применяют иглу из закаленной стали с конусообразным острием (угол при вершине 30° , радиус при вершине 0,1 мм.) По усилию пружины, воздействующей на индентор, в пределах от 1 до 45 Н различают величины твердости по Шору D от 0 до 100. Глубина вдавливания t индентора должна составлять 2,54 мм при $D = 0$ и быть равна нулю при $D = 100$.

Определение глубины вдавливания пуансона. Этот метод применяют для испытания образцов или выверленных проб из литого асфальта, битумной мастики и аналогичных смесей. В качестве индентора используют пуансон с плоской рабочей поверхностью диаметром 25,2 мм (при испытании смесей для уличных магистралей) и 11,3 мм (при испытании смесей для наземного и подземного строительства). Усилие при испытании составляет 523,91 Н, длительность нагружения 0,5 или 5 с. Глубину вдавливания пуансона измеряют в миллиметрах.

2.12. ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТВЕРДОСТИ

Напряженное состояние при испытании на растяжение и при определении твердости различное, и поэтому физического смысла зависимость между временным сопротивлением при растяжении Q и величиной твердости НВ не имеет. Для ограничения числа случаев очень давно для нелегированных нормализованных сталей было предложено эмпирическое соотношение, пользоваться которым надо с большей осторожностью.

Само собой разумеется, что значения временного сопротивления при растяжении, определенные по величине твердости, как весьма ориентировочные, следует особо пометать и ни в коем случае не подменять ими точное определение временного сопротивления при испытаниях на растяжение, в том числе и при статических. Зависимости, определенные для других материалов, например для меди, латуни, отожженной алюминиевой и оловянной бронзы ($Q_b = 5,5$ НВ), холоднодеформированной бронзы ($Q_b = 4$ НВ) или для алюминия и его сплавов ($Q_b = 3,7$ НВ), вообще не смогли утвердиться в практике.

Физический смысл соотношения нагрузок при испытании на твердость также пока еще не полностью выяснен, поэтому отсутствует точная методика пересчета параметров твердости, определенных различными методами. Однако в этом случае на практике не следует избегать сравнения значений, полученных при использовании разных способов определения твердости. Для этой цели существуют таблицы пересчета, составленные по эмпирическим данным.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое твердость?
2. Как производится определение твердости по Моосу?
3. Какие минералы применяются в шкале Мооса?
4. Как производится определение твердости по Бринеллю?
5. Как производится определение твердости по Виккерсу?
6. Как производится определение твердости по Роквеллу?
7. Как производится определение твердости по Шору?
8. Как производится определение твердости по Кнупу?

3. ИСПЫТАНИЕ НА ИЗНОС

Износ – это процесс, при котором оборудование теряет свои эксплуатационные способности. Возникает вследствие трения между частями и деталями.

Основные типы износа: качение, скольжение, вращение.

Бывает сухой износ и при наличии смазки. Абразивный износ вызван частицами меньшими по размеру.

Кавитационный износ – для морских судов, деталей движущихся в массе.

Износ характеризует: линейная величина износа, скорость износа, абсолютная V величина износа, абсолютная величина по массе.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое износ?
2. Какими параметрами характеризуется износ?
3. Какие бывают виды износа?

4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ ИСПЫТАНИЙ

Программа испытаний – это обязательный для выполнения организационно-методический эксперимент. Программа устанавливает цели испытаний, объект испытаний, объем и методику проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, ответственность за обеспечение и проведение испытаний, ответственность за оформление протоколов и отчетов по испытаниям.

Все испытания по своему назначению разделяют на четыре группы: исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные.

Немаловажную роль в программе испытаний играет план проведения испытаний. В плане указываются работы необходимые для проведения испытаний, изготовления образцов, приемка образцов, измерение и определение параметров образцов объекта испытаний, подготовка испытательного оборудования, оформление результатов испытаний, согласование утверждения протокола испытаний и др.

Основной задачей определительных испытаний является определение характеристик изделия или материала. Существенным является правильно сформулировать цели испытания.

Цель испытания раскрывает его назначение, которое должно отображаться в наименовании испытаний.

Чтобы правильно сформулировать наименование испытания, используют следующие признаки:

- назначение испытания (исследовательские, контрольные, сравнительные, определительные);
- уровень проведения испытаний (государственные, межведомственные, ведомственные);
- по отношению к испытаниям готовой продукции (квалифицированные, предъявительские, приемодаточные, периодические, инспекционные, типовые аттестационные, сертификационные);
- по отношению к этапам разработки продукции (доводочные, предварительные, приемочные);
- по условию к месту проведения испытаний (лабораторные, стендовые, полигонные, натурные, испытания с использованием моделей, эксплуатационные);
- по продолжительности испытаний (нормальные, ускоренные, сокращенные);
- по виду воздействия (механические, климатические, термические, радиационные, электрические, электромагнитные, магнитные, химические, биологические и др.);
- по результату воздействия (неразрушающие, разрушающие, испытания на стойкость, прочность, устойчивость);

– по направленности на определение характеристики объекта (функциональные, испытания на надежность, транспортабельность, граничные испытания, технологические испытания).

1. **Описание объекта испытаний.** Главным признаком объекта испытаний является то, что по результатам его испытаний принимается то или иное решение, а именно его годность или выбраковывание, предъявление на следующие испытания, возможность серийного выпуска и т.д.

В программе следует дать краткую форму описания объекта (информацию об объекте) испытаний, сроках его изготовления, номер сопроводительного паспорта, особенности конструкции и технологий. При описании объекта учитываются параметры: критерий годности изделия, требования к внешнему виду и другим параметрам.

2. **Объем и методика.** Это раздел программы испытаний, в которой даются сведения о количестве испытываемых изделий, общей продолжительности испытаний при различных воздействиях факторов, о периодичности проведения испытаний, составе и последовательности испытаний, о параметрах испытательных режимов, пределах измерения питающих напряжений и продолжительности работы изделия при этих напряжениях и т.д.

3. **План проведения испытаний.** В плане указываются работы, необходимые для проведения испытаний, изготовления образцов, приемка образцов ОТК, измерение и определение параметров образцов объекта испытаний; подготовка испытательного оборудования, проведение испытаний; оформление результатов испытаний, согласование и утверждение протокола испытаний и др. Для проведения испытаний, представления информации о той или иной программе испытаний составляется карта проведения испытаний (обычно в произвольной форме).

4.1. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ

На титульном листе размещают наименование программы испытаний; наименование темы, по которой ведется контроль (разработка) изделия; согласующие и утверждающие руководителя организации, разработчика и представителя заказчика.

Программа испытаний содержит шесть разделов:

1. **Объект испытаний:** включает полное и краткое наименование чертежей и заводские номера, номера партий, даты выпуска объекта испытаний.

2. **Цель испытаний:** формируется конкретная цель или цели испытаний, определение целесообразности испытаний.

3. **Обоснование необходимости проведения испытаний:** указываются плановые документы, в которых регламентирована необходимость проведения испытаний.

4. **Место проведения и обеспечение испытаний:** указывают подразделение, в котором проводится испытание, а также содержит планы работ по подготовке и проведению испытаний с графами, указывающими исполнителя и объем работы, срок исполнения.

5. **Объем и методика испытаний:** раздел раскрывает содержание испытаний. Включает два подраздела:

1) указывается число образцов и разделение на группы, последовательность прохождения различных групп по видам воздействий с регламентацией количественной оценки воздействия, указываются номера чертежей оснастки, необходимые для проведения испытаний.

2) содержатся сведения о контролируемых параметрах изделия с указанием документации, по которой требуется измерить или определить эти параметры.

6. **Оформление результатов испытаний:** регламентируется форма представления результатов проведенного испытания – протокол, отчет, технические справки и т.д.

В конце программы ставится подпись руководителей подразделений, принимавших участие в проведении испытаний и при необходимости подпись представителя заказчика.

4.2. ВЫБОР ОБЪЕКТА ИСПЫТАНИЙ И ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Объектами испытаний являются: макеты, модели, экспериментальные образцы изделий, изготовленные при выполнении научно-исследовательских работ на этапе проектирования.

Опытные образцы изделий, изготовленные при выполнении опытно-конструкторских работ, отличаются тем, что они изготавливаются непосредственно на производстве:

- образцы, изготовленные при внедрении или освоении изделия в производстве;
- образцы, изготовленные в ходе установившегося серийного или массового производства.

При выборе объекта испытаний учитываются следующие требования:

- необходимость доказательства работоспособности изделия при оговоренной НТД в условиях эксплуатации;
- необходимость доказательства соответствия параметров надежности требуемым в НТД значениям;
- минимальная стоимость испытаний, включая затраты на испытательное оборудование;
- минимальная продолжительность испытаний;
- наличие соответствующего оборудования и оснастки, обеспечивающих проведение испытаний;
- необходимость обеспечения взаимозаменяемости отдельных функциональных блоков и узлов;
- возможность обеспечения оптимального контроля технических процессов;

– необходимость определения параметров надежности элементов и компонентов, применяемых в изделии.

4.3. ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЯ И ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Под условиями испытаний понимают совокупность воздействий на объект и режимов функционирования объекта.

Главные принципы выбора условий испытаний:

- адекватность условиям эксплуатации;
- разделение условий по уровням воздействия;
- учет механизма старения или развития отказа;
- учет всех элементов конструкции.

Достоинства испытаний на низких уровнях:

- возможность оценки уровня сборки, на котором еще можно реализовать замену элементов;
- возможность испытаний блоков с независимым вводом данных;
- возможность быстрого обнаружения слабых мест изделий, определение процессов деградации, причин и механизмов отказов отдельных элементов;

– удобство оценки динамических характеристик.

Недостатки испытаний на низких уровнях:

- невозможность оценки некоторых параметров, влияющих на совместную работу блоков;
- трудности оценки проявления постепенных отказов.

Достоинства испытаний, проводимых на уровне системы:

- возможность оценки характеристик системы в целом;
- возможность обнаружения взаимного влияния блоков;
- проверка возможности заменяемости блоков.

Недостатки испытаний на уровне системы:

- невозможность оценки характеристик блоков, входящих в состав системы;
- неизбежность забракования всего комплекта аппаратуры при отказе системы;
- трудности определения места отказа;
- высокая стоимость испытаний в целом.

Для уменьшения объема испытаний, испытания проводят не на всей партии изделий, а только для выборки.

Выборки различают:

1) по способу образования:

- повторные;
- неповторные;

2) по преднамеренности отбора:

- преднамеренные;
- случайные;

3) по отношению ко времени образования:

- единовременные;
- текущие.

Повторная выборка образуется путем извлечения изделий из генеральной совокупности с последующим их возвращением после определения параметров качества.

При *бесповторной* выборке изделие не может быть возвращено в генеральную совокупность.

Если изделия отбираются преднамеренно по какому-либо признаку, такую выборку называют *преднамеренной*.

Случайная выборка образуется при отборе изделий из партии генеральной совокупности, если для любого изделия обеспечивается равная вероятность быть отобранным и включенным в выборку.

Единовременная выборка образуется из партии изделий после их изготовления независимо от того, в какой момент времени изготовлено каждое изделие.

Текущая выборка состоит из изделий, последовательно изготовленных за определенный промежуток времени:

$$P = \frac{N - D}{N} = 1 - Q,$$

где N – количество изделий в выборке; D – количество бракованных изделий; Q – вероятность брака;

$$P = P_N \text{ при этом } Q_{II} < Q_N,$$

n – партия; N – выборка; α – вероятность того, что партия годных изделий будет оценена как негодная, риск изготовителя; β – вероятность того, что партия негодных изделий будет оценена как годная, риск потребителя

$$\alpha, \beta < 0,05 \dots 0,1;$$

$$T^* \geq \frac{\ln(T_0/T_1) - 1/k \cdot \ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)}{1/T_1 - 1/T_0},$$

T_0 – установленная директивно-приемочная наработка на отказ (изготовитель); T^* – наработка на отказ; T_1 – установленное потребителем требование наработки на отказ

$$(1-\alpha) T_0; \quad \beta - T_1;$$

k – количество изделий в выборке.

4.4. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Методика испытаний – это организационно-методический документ, обязательный к выполнению, в котором формулируются:

- метод испытаний;
- средства и условия испытаний;
- отбор проб;
- алгоритм выполнения операций по определению одной из нескольких взаимосвязанных характеристик, свойств объекта;
- формы представления данных и оценивание точности;
- достоверность данных и результатов;
- требование техники безопасности и охраны окружающей среды.

Основное требование к методике испытаний – обеспечить максимальную эффективность процесса испытаний и минимальную погрешность полученных результатов.

Метод испытаний – это совокупность правил применения определенных принципов и средств для осуществления испытаний. При выборе метода учитывают конструктивно-технологические особенности изделия, нормы контролируемых параметров и требуемые точности их измерения, требования безопасности проведения испытаний.

Под средствами технических испытаний понимают технические устройства, вещества и материалы, применяемые при проведении испытаний.

Содержание методики испытаний. Методика испытаний должна содержать описание следующих этапов процесса испытаний:

- 1) проверку испытательного оборудования;
- 2) подготовку испытываемых изделий;
- 3) совместную проверку испытательного оборудования и испытываемого изделия;
- 4) регистрацию результатов испытаний и данных об условиях их проведения.

При проведении испытаний необходимо обеспечить правильность применения средств испытаний, проведения измерений и контроля параметров объективных факторов, воздействующих на испытываемое изделие. Большая часть характеристик испытываемого изделия определяется в процессе измерений.

Обеспечение максимальной точности достигается выполнением следующих методических указаний:

1) измерительные приборы или шкалы показывающих приборов следует выбирать так, чтобы отсчеты выбирались вблизи максимальной отметки шкалы;

2) у сложного испытательного оборудования, состоящего из отдельных блоков, всегда должна примеряться общая погрешность. Измерения необходимо проводить в месте сопряжения оборудования с испытываемым изделием. Перед испытанием производится совместное испытание испытательного оборудования;

3) регистрация результатов испытаний обеспечивается развернутой формой записи данных, подробным описанием выполняемых регулировок, операций с переключением и кнопками, схемой расположения приборов и монтажных схем.

Форма записи данных должна быть достаточно подробной и должна гарантировать регистрацию всех входных и выходных данных с указанием единиц измерения, приведенных к единой системе. Должно быть предусмотрено место для записи параметров, характеризующих определенные условия (температура, влажность, закаленность и т.д.), даты регистрации, сведения о лицах, проводящих испытания, информация, описывающая точную конфигурацию испытываемого изделия. Форма записи данных должна содержать сведения о критериях приемки или браковки в случае приемосдаточных испытаний.

4.5. ПРИМЕР ОБЩИХ ТРЕБОВАНИЙ К СОСТАВЛЕНИЮ ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ

1. **Общие положения.** Настоящая программа испытаний составлена на основании ... (перечень ГОСТов, ОСТов и т.д.).

Приборы изготовлены в соответствии с требованиями ... (ГОСТы).

Государственные приемочные контрольные испытания средств измерений проводятся по ГОСТ 8001–80, методы и средства поверки по ГОСТ 8042–72.

2. **Объект испытаний.** На предприятии испытанию подвергаются номера экземпляров приборов. Одновременно с выбором объекта испытаний и проверяемых признаков должны быть определены входные условия и внешние факторы условий испытаний.

3. **Объем и последовательность испытаний.** Параметры климатических факторов для рабочих условий применения и предельных условий транспортировки. Указывается последовательность испытаний. Для приборов рекомендуются следующие: механические испытания на смену температур, на теплоустойчивость, на влагоустойчивость, на холодоустойчивость, на пониженное атмосферное давление, на влагоустойчивость (2 цикл) и др. Для сокращения общей продолжительности испытаний допускается проведение параллельно всех видов климатических и механических испытаний. Перед началом и после каждого испытания, а в необходимых случаях, и во время испытаний, проводится осмотр и измерение параметров средств измерений. С начала испытаний должны быть зафиксированы наработка аппаратуры, все отказы, повреждения, дефекты и моменты их возникновения.

4. **Выбор пунктов для проведения испытаний аппаратуры в природных условиях.**

5. **Выбор испытательного оборудования.** Успех выполнения программ испытаний зависит от него. Испытательное оборудование определяет точность испытаний и измерений, воспроизводимость и возможность правильной интерпретации результатов испытаний, экономическую эффективность, стоимость выполнения программ испытаний. Выбор средств испытательного оборудования определяется требованиями ГОСТ 24813–89 и требованиями других стандартов, в том числе отраслевых и другой НТД.

6. **Методика испытаний:**

- испытание средств измерений на воздействие климатических и механических факторов;
- испытания на влагоустойчивость;
- испытания на циклическое воздействие температур;
- испытания на прочность при транспортировке.

7. **Оценка и оформление результатов испытаний.** Метод оценки результатов испытаний и критерий отказов аппаратуры, определяемый на основании требований к ее основным параметрам и функциональному назначению должны быть указаны в стандартах, технических условиях и других НТД. По результатам испытаний составляется сводная ведомость неисправностей. По результатам анализа причин отказов и неисправностей, зафиксированных при испытаниях, разрабатываются и осуществляются мероприятия по их устранению. При неудовлетворительных результатах испытаний после проведенных мероприятий испытания повторяют на образцах, изготовленных с учетом разработанных мероприятий.

Отказом при испытаниях на надежность считается такое состояние аппаратуры, при котором она полностью теряет способность выполнять заданные функции или любой ее основной параметр, находящийся за пределами установленных допусков, оговоренных в технических условиях.

При анализе отказов по результатам испытаний их классифицируют по следующим параметрам:

- по месту возникновения;
- по условиям возникновения;
- по причинам возникновения;
- по характеру изменения параметра (внезапные и постепенные);
- по связи с другими отказами (независимые и зависимые);
- по характеру устранения отказов (отказы и сбои).

8. **Дается количественная оценка показателей качества испытываемых изделий.**

9. **Анализируются результаты испытаний.**

10. **По результатам испытаний составляется отчет по форме, приведенной в стандарте и другой НТД.** В отчете по испытаниям приводят сведения об объекте, цели, месте и времени испытаний, материально-техническом обеспечении, условиях и результатах испытаний и даются выводы и рекомендации по результатам испытаний.

4.6. ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ

В настоящее время выделяют два основных направления: планирование экспериментальных исследований и планирование экспериментов по выяснению механизмов явлений. Планирование первого вида целесообразно применять в следующих случаях:

- 1) при выборе параметров изделий и условий его эксплуатации, обеспечивающих получение оптимальных в определенном смысле показателей качества функционирования изделия (контрольные, оценочные, сравнительные и т.д.);
- 2) при необходимости оценить предельные возможности изделия при действии на него комплекса возмущений для определения технического ресурса аппаратуры (изделия);
- 3) при необходимости выполнить условия, при которых процесс испытаний удовлетворяет некоторому критерию оптимальности.

Планирование второго вида целесообразно использовать в случаях, когда в процессе испытания необходимо установить зависимость выходных характеристик параметров испытываемого объекта от различных возмущающих факторов, т.е. функция, описывающая связь между входными воздействиями и контролируруемыми выходными характеристиками.

Планирование первого вида позволяет определить такую последовательность операций, которая обеспечивает достижение целей с минимальными затратами. Планирование второго вида необходимо для того, чтобы изучить механизм протекания процесса в испытываемом изделии, при воздействии на него различных возму-

шающих факторов и тем самым определить состав испытательных воздействий наиболее полно определяющих реальные условия эксплуатации.

Уравнение регрессии

$$y = b_0 + \sum b_{ij} x_i \quad \text{при } i = \bar{0}, \bar{N}, \quad j = \bar{0}, \bar{K},$$

где x – факторы, оказывающие влияние; y – выходной параметр;

$$b_{ij}^* = N^{-1} \sum_{i=1}^k x_{ij} y_j ;$$

$$i = \bar{0}, \bar{N}, \quad j = \bar{0}, \bar{K},$$

σ^2 – дисперсия.

Уравнение регрессии используется для определения объема выборки:

$$N \geq C_{k+d}^d ;$$

d – степень полинома;

$$n = \frac{t_\alpha^2 \sigma^2}{\Delta^2} ;$$

$$t_\alpha = 2 \quad p = 0,95, \quad t_\alpha = 3 \quad p = 0,997 ;$$

$N_1 \geq \frac{t_\alpha^2 \sigma^2 C_{k+d}^d}{\Delta^2}$ – общее количество приборов, затрачиваемых на проведения испытаний.

Для планирования наблюдений и анализа результатов испытаний, независимо от их вида, необходимо знать: номенклатуру объектов наблюдений и измерительно-испытательного оборудования, перечень показателей качества, подлежащих оценке по результатам наблюдений, условий эксплуатации и режим работы с учетом изменений условий эксплуатации и режима работы в течение исследований, сведения о наработке, месте и времени наступления отказа, время и способ восстановления, наименование запасных частей, время простоя, величина ущерба накопленного отказа.

Качественный и количественный анализ информации заключается в следующем:

- отсеивание недостоверной информации;
- проверка однородности информации;
- статистическая обработка информации и определение оценок показателей надежности;
- отбор массивов информации для решения задач конструктивного усовершенствования изделий с точки зрения повышения их качества и надежности;
- усовершенствование технологий изготовления, контроля и испытаний;
- разработка мероприятий направленных на повышение качества ремонта, на соблюдение правил эксплуатации и повышение эффективности технического обслуживания и текущих ремонтов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое программа испытаний?
2. Какие разделы входят в программу испытаний?
3. Что должно включать в себя название программы испытаний?
4. Что входит в методику испытаний?
5. Какие разделы обязательны в методике проведения испытаний?

5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Автоматизация испытаний осуществляется по двум основным направлениям.

Первое характерно для массовых видов изделий и испытаний и связано с созданием специализированных машин, комплектов для контроля качества и статистической оценки свойств материалов по стандартизированным методикам, обеспечивающим автоматическое управление режимами испытаний, централизованный сбор информации в многоточечных системах и обработку однотипных результатов испытаний.

Второе характерно при проведении многофакторных испытаний по программам, которые могут изменяться или совершенствоваться в процессе испытаний, для чего необходимо универсальное оборудование с мобильной структурой, легко приспособляемой для решения различных задач.

Автоматизация испытаний дает возможность:

- повысить эффективность разработок объектов испытаний и уменьшить затраты на их обработку;
- получить качественно новые результаты, достижение которых принципиально невозможно без использования автоматизированных систем исследований;
- повысить оперативность в получении, обработке и использовании информации о качестве и надежности изделий.

Наиболее важными составными частями автоматизируемых контрольно-испытательных установок являются механизмы, выполняющие следующие функции:

- подача объекта к месту контроля или испытания;
- ориентация и закрепление аппаратуры;
- включение в измерительную и контрольную схему;
- выполнение заданной программы контроля или испытаний;
- фиксация результатов испытаний;
- выключение испытуемого изделия из измерительных и контрольных схем;
- открепление изделия;
- съем изделия с места испытаний;
- транспортирование объекта на следующую операцию.

В соответствии с этим в структурную схему автомата или полуавтомата для контроля или испытания объекта входят следующие функциональные узлы:

- механизмы перемещения (транспортёры), ориентации;
- закрепление и включение прибора в измерительную и контрольную схему;
- блок задания испытательных режимов по принятой программе;
- преобразователь и усилительно-измерительные устройства для измерения показаний при контроле или испытании объекта;
- записывающие устройства, фиксирующие результаты испытаний, отбраковывающие устройства;
- счетчик;
- блокировочное устройство для остановки всего процесса;
- устройство для транспортирования объекта на следующую операцию.

Техническое задание на разработку автоматизированной системы испытаний (АСИ) содержит:

- перечень функций АСИ с их краткой характеристикой;
- характеристики необходимой точности и быстродействия, выполнения каждой функции и их совокупности;
- значение показателей надежности для системы и реализуемых ею отдельных функций;
- режимы функционирования по реализации каждой управляющей функции;
- характеристики совместимости АСИ со сменными системами;
- сведения об условиях эксплуатации АСИ и ее составных частей;
- метрологические характеристики измерительных каналов;
- эргономические требования к АСИ (удобство эксплуатации, в частности по способу и форме представления информации оператору);
- требования по численности и квалификации оперативного и обслуживающего персонала.

5.1. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИСПЫТАНИЙ

Автоматизированные системы испытаний являются одним из звеньев общей интегрированной системы автоматизации производства. На рис. 56 представлена иерархия автоматизированных систем завода. На 5 уровне находятся исполнительные механизмы и датчики, сигнал с которых поступает на уровень контроллеров (4), и далее на автоматизированные системы испытаний – уровень 3. Как правило, несколько автоматизированных систем могут объединяться в систему более высокого уровня (2), в свою очередь автоматизированные системы этого уровня передают обобщенные данные на уровень ЭВМ управляющих цехами, и затем центральной ЭВМ завода. Такая иерархия позволяет контролировать с одной стороны практически каждый преобразователь с центральной ЭВМ и в то же время не загружает центральную ЭВМ управлением производственными объектами, позволяя руководству завода сосредоточиться на глобальном планировании и управлении производством.

Датчики в автоматизированных системах могут подключаться по нескольким схемам.

Преимущество радиальной системы, представленной на рис. 57, – высокое быстродействие и независимое снятие показаний с датчиков; однако эта система обладает плохой ремонтпригодностью и надежностью из-за большого количества сигнальных и управляющих проводов, кроме того она является очень дорогой. Данная структура реализуется, в основном, в исследовательских автоматизированных системах испытаний.

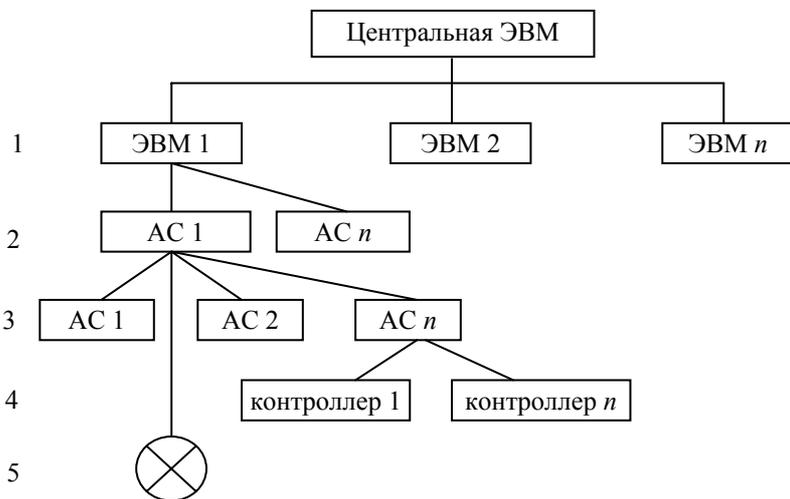


Рис. 56. Иерархия автоматизированных систем



Рис. 57. Радиальная структура



Рис. 58. Кольцевая структура

На рис. 58 представлена кольцевая структура. В ней все датчики и управляющая ЭВМ объединены в управляющее кольцо и сигнал последовательно передается от модуля к модулю. Системы, построенные по такой структуре, обладают достаточно низким быстродействием и при выходе хотя бы одного блока из строя измерения останавливаются, однако они дешевы и достаточно часто применяются в системах, где не требуется высокое быстродействие.

Системы, построенные по радиально-кольцевой структуре, в настоящее время являются преобладающими (рис. 59). Эта структура при относительно малом (от двух) количестве сигнальных проводов позволяет построить системы с приемлемым быстродействием и не зависит от выхода из строя отдельного элемента системы.

Автоматизированная систем включает в себя ряд элементов.

Техническое обеспечение – совокупность взаимодействующих и объединенных в единое целое устройств получения, ввода, подготовки, обработки, хранения, регистрации, вывода, отображения, использования, передачи информации и средств реализации управляющих воздействий автоматизированной системы испытаний.

Математическое обеспечение – это методы, математические модели системы и испытываемых изделий, алгоритм функционирования автоматизированной системы испытаний и решения отдельных задач испытаний.

Программное обеспечение – программы, необходимые для реализации всех функций автоматизированной системы испытаний.

Информационное обеспечение – нормативно-справочная документация, например, содержащая описание стандартных испытательных процедур, типовых управляющих решений и т.д., форма предоставления и организации данных автоматизированной системы испытаний, в том числе формы документов в виде видеограмм и протокола обмена данными.

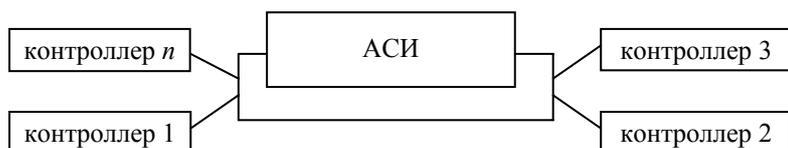


Рис. 59. Радиально-кольцевая структура

Лингвистическое обеспечение АСИ – тезауры (словари), языки описания и манипулирования данными, управление процессами испытаний и программирования.

Организационное обеспечение – это совокупность правил и предписаний, устанавливающих структуру организации и ее подразделений и их функции, и требуемое взаимодействие персонала автоматизированных систем с комплексом технических средств и между собой.

Методическое обеспечение – документация, в которой содержится состав, правила отбора и эксплуатации комплексов АСИ, последовательность операций, реализующих типовые процедуры контроля и испытаний, инструкции по работе с оборудованием.

Метрологическое обеспечение АСИ – состоит из метрологических средств и инструкций по их применению.

К техническому обеспечению АСИ предъявляются следующие требования:

- 1) комплекс технических средств АСИ должен быть достаточен для реализации всех функций, установленных в техническом задании на систему;
- 2) в комплекс технического оборудования АСИ должны входить технические средства, необходимые для наладки и проверки работоспособности технических средств и запасные приборы;
- 3) технические средства автоматизированных систем испытаний должны иметь срок службы не менее 6 лет, а их технические характеристики должны обеспечивать взаимозаменяемость одноименных средств без изменения и регулировки остальных;
- 4) структура и характеристики технических средств в АСИ должны обеспечивать принцип автоматизации, максимальное использование изделий Государственной системы промышленных приборов и СИ, обеспечивать возможность модернизации;
- 5) техническое обеспечение АСИ должно быть надежным, устойчивым к внешним воздействиям, нестабильности источников питания и создавать минимальный уровень промышленных помех.

По выполняемым функциям технические средства можно разделить на пять основных групп:

- 1) средства воспроизведения внешних воздействующих факторов (испытательные камеры и установки);
- 2) контрольно-измерительные средства (устройства тестового контроля и т.д.);
- 3) средства управления, обработки и преобразования данных (ЭВМ с винчестером, устройства связи, АЦП, ЦАП и т.д.);
- 4) средства оперативного воздействия инженера-испытателя с системой (клавиатура, пульт, монитор, лампочки);
- 5) средства ввода-вывода информации на машинные носители (перфокарты, принтера, плоттера и т.д.).

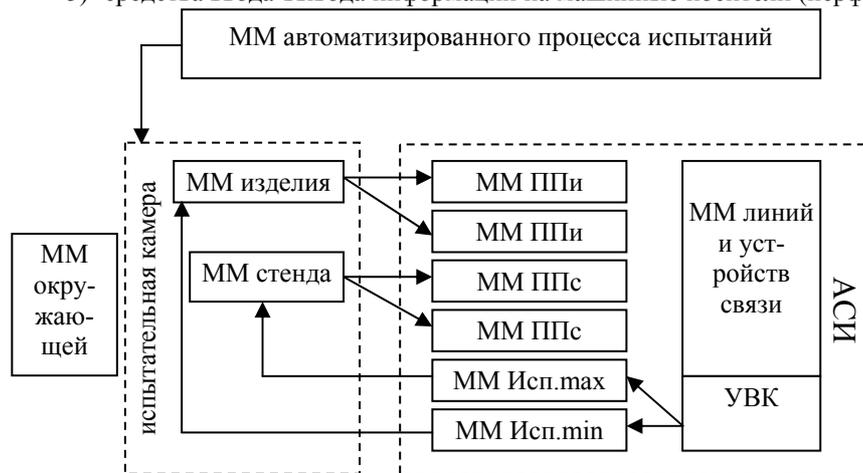


Рис. 60. Структура математического обеспечения АСИ:
 ММ – математическая модель; ППс – первичный преобразователь стенда;
 ППи – первичный преобразователь изделия

На рис. 60 представлена общая структура математического обеспечения АСИ, позволяющая связать модели в единое целое и рассматривать автоматизированную систему испытаний как единый объект.

В состав программного обеспечения АСИ входят общее программное обеспечение, которое включает программы и операционные системы, обслуживающие стандартные программы.

Программы и операционные системы включают в себя управляющие программы; перемещаемые загрузчики; трансляторы с языков высокого уровня, низкого; редакторы и т.д.

Обслуживающие программы обеспечивают управление вводом-выводом данных, обработку прерываний, тестирование и диагностику установок, блоков и систем.

Специальное программное обеспечение обеспечивает решение специфических задач АСИ.

Пакеты прикладных программ представляют собой совокупность взаимосвязанных программ, предназначенных для реализации функций или группы функций АСИ.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие существуют схемы построения автоматизированных систем испытаний?
2. В чем особенность автоматизации типовых испытаний?

3. В чем особенность автоматизации исследовательских испытаний?
4. Что входит в техническое обеспечение автоматизированных систем испытаний?
5. Что такое информационное обеспечение автоматизированных систем испытаний?
6. Что такое математическое обеспечение автоматизированных систем испытаний?
7. Что такое методическое обеспечение автоматизированных систем испытаний?
8. Что такое метрологическое обеспечение автоматизированных систем испытаний?
9. Что такое организационное обеспечение автоматизированных систем испытаний?

6. АККРЕДИТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Основным документом, определяющим процедуру аккредитации испытательных лабораторий на независимость и техническую компетентность, является ГОСТ Р 51000.4–96.

Процедура аккредитации включает пять этапов.

1 этап – рассмотрение заявки на аккредитацию:

- 1) представление заявителем заявки на аккредитацию с комплектом документов;
- 2) анализ документов или предварительное рассмотрение заявки с комплексом документов, принятие решений по заявке;
- 3) заключение договора на проведение работ по аккредитации (заявка рассматривается в течение месяца).

2 этап – экспертиза документов:

- 1) назначение экспертов для проведения экспертизы документов;
- 2) проведение экспертизы документов и оформление экспертного заключения;
- 3) выдается экспертное заключение и принимается решение о прекращении аккредитации или о ее продолжении.

3 этап – аттестация заявителя:

- 1) назначение экспертов по аттестации заявителя или формирование комиссии;
- 2) проведение аттестации заявителя и оформление акта аттестации.

4 этап – решение об аккредитации:

- 1) анализ всех материалов по аккредитации (по результатам экспертизы и аттестации, информации, представленной заявителем) и принятие решения об аккредитации;
- 2) оформление, регистрация в реестре и выдача аттестата аккредитации.

5 этап – инспекционный контроль за аккредитованными организациями.

В заявке на аккредитацию должны быть отражены:

- заявленная область аккредитации;
- осведомленность заявителя о требованиях системы аккредитации;
- готовность заявителя в полной мере выполнять процедуру аккредитации, в том числе принять группу экспертов (комиссию) для аттестации лабораторий, оплатить расходы, связанные с работой по аккредитации (независимо от результата аккредитации и последующему инспекционному контролю);
- подтверждение заявителем своего согласия выполнять требования, обусловленные аккредитацией.

Испытательная лаборатория обязана:

- исполнить соответствующие требования ГОСТ Р 51000.3, 51000.4–96;
- создавать необходимые условия для проведения аккредитирующим органом инспекционного контроля за деятельностью испытательной лаборатории, повторной аккредитации испытательной лаборатории и принятия решений по жалобам, включая доступ полномочным аккредитирующим органом лиц к документации, персоналу и всем сферам деятельности;
- заявить о своей аккредитации только в отношении деятельности, включенной в область аккредитации;
- не использовать свою аккредитацию таким образом который мог бы подорвать доверие к аккредитующему органу;
- не делать заявлений относительно своей аккредитации, которые могли бы ввести в заблуждение потребителей ее услуг или органов управления;
- после приостановления или отмены не делать никаких заявлений, которые содержат ссылку на нее, вернуть все документы, которые потребовал аккредитующий орган;
- не допускать использование аккредитации таким образом, который позволял бы предположить, что результаты испытаний полученной испытательной лабораторией одобрены аккредитирующим органом.

Вместе с заявкой предоставляется следующая информация:

- общая характеристика испытательной лаборатории (наименование, адрес, юридический статус, персонал штатный и нештатный, техническое оборудование);
- общие сведения об организации, в состав которой входит лаборатория заявителя;
- основная область деятельности, отношения с другими организациями, местонахождение лабораторий, включенных в заявку на аккредитацию;
- перечень должностных лиц испытательной лаборатории с указанием Ф.И.О., несущих ответственность за техническую корректность протоколов испытаний;
- описание внутренней организации и системы качества, применяемой в испытательной лаборатории;
- форма протоколов испытаний, которые испытательная лаборатория планирует выдавать, после того, как будет аккредитована.

Содержание программы проведения аттестации.

При проведении аттестации должно быть рассмотрено следующее:

- 1) экспертное заключение на документы, представленные организацией заявителя;
- 2) заявленная область аккредитации;
- 3) статус юридического лица организации заявителя, особенно в части целей, предмета деятельности, источников и принципов финансирования;
- 4) административная подчиненность и финансовая деятельность, оценка независимости заявителя;
- 5) компетентность и опыт работы в заявленной области;
- 6) наличие специалистов и другого персонала испытательной лаборатории с точки зрения его квалификации и опыта работы в проведении испытаний;
- 7) наличие инструкций и требований к качеству проведения испытаний, образованию, техническим знаниям;
- 8) соответствие установленным требованиям, соотношение штатного и нештатного персонала испытательной лаборатории;
- 9) документы испытательной лаборатории и оценка их соответствия установленным требованиям.

Вопросы для самопроверки

1. Для чего нужна аккредитация испытательных лабораторий на независимость и техническую компетентность?
2. Какова процедура аккредитация испытательных лабораторий на независимость и техническую компетентность?
3. Какие документы подаются при подаче заявки?
4. Что проверяется при проведении аттестации?
5. Кем проводится аккредитация испытательных лабораторий на независимость и техническую компетентность?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бегларян, В.Х. Климатические испытания аппаратуры и средств измерений / В.Х. Бегларян. – М. : Машиностроение, 1983. – 156 с.
2. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование : учебное пособие для вузов / О.П. Глудкин, А.Н. Енгальчев, А.И. Коробов, Ю.В. Трегубов ; под ред. А.И. Коробова. – М. : Радио и связь, 1987. – 272 с.
3. Испытание материалов : справочник / под ред. Х. Блюменауэра. – М. : Металлургия, 1979. – 448 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ	3
2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ	62
3. ИСПЫТАНИЕ НА ИЗНОС	74
4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ ИСПЫТАНИЙ	75
5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ	85
6. АККРЕДИТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	94