

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ
Учебно-методическое пособие

Электронное издание

Красноярск
СФУ
2013

УДК 620.1.(07)

ББК 30.1.я73

О 641

Составители: Пикалов Юрий Анатольевич, Секацкий Виктор Степанович,
Пикалов Яков Юрьевич.

О 641 Организация и технология испытаний. Учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] / сост. Ю.А. Пикалов, В.С. Секацкий, Я.Ю. Пикалов. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – Систем. требования: PC не ниже класса Pentium I; 128 Mb RAM; Windows 98/XP/7; Adobe Reader V8.0 и выше. – Загл. с экрана.

Приведены основные понятия о методах и видах испытаний материалов и изделий. Рассмотрены вопросы планирования и автоматизации испытаний, а также раскрыты процедуры аккредитации испытательных лабораторий.

Предназначено для студентов всех форм обучения по направлениям подготовки бакалавров 221400.62 – «Управление качеством» и 221700.62 – «Стандартизация и метрология» по дисциплине «Организация и технология испытаний», а также может быть использовано преподавателями, магистрантами, аспирантами и студентами других специальностей для организации самостоятельной работы по изучению методов и процедур проведения испытаний продукции и материалов.

УДК 620.1.(07)

ББК 30.1.я73

© Сибирский
федеральный
университет, 2013

Электронное учебное издание

Подготовлено к публикации Издательским центром БИК СФУ

Подписано в свет 21.11.2013 г. Заказ 3255.
Тиражируется на машиночитаемых носителях.

Издательский центр Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
Тел/факс (391)206-21-49. E-mail rio.bik@mail.ru
<http://rio.sfu-kras.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ОБЛАСТИ ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ.....	7
1.1. Соотношение понятий измерений, испытаний и контроля	11
1.2. Задачи и виды контроля	12
2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗДЕЛИЯ И МАТЕРИАЛЫ.....	14
2.1. Климатические воздействия	14
2.2. Механические воздействия	15
2.3. Биологические воздействия	17
2.4. Космические воздействия	21
2.5. Ионизирующие и электромагнитные воздействия	22
2.6. Специальные среды	24
3. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ	24
4. СПОСОБЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ	33
5. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИСПЫТАНИЙ.....	36
5.1. Повреждения и отказы	39
5.2. Временные понятия	40
5.3. Количественные показатели надежности объекта, как технологической системы	41
5.4. Нарботка до отказа и на отказ. Вероятность безотказной работы и вероятность отказа. Интенсивность отказов. Параметр потока отказов	42
5.5. Ресурс и срок службы	48
5.6. Вероятность, интенсивность, трудоемкость и время восстановления	49
5.7. Срок сохраняемости.....	50
5.8. Коэффициент готовности, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения эффективности	50
6. ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ	53
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ.....	62
7.1. Испытания при одноступенчатом методе контроля.....	65
7.2. Испытания при последовательном методе контроля	71
8. ОРГАНИЗАЦИЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ	76
8.1. Виды ускоренных испытаний	84
8.2. Основные принципы ускоренных испытаний	88
9. ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ.....	96
10. ИСПЫТАНИЕ НА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ.....	99
11. ИСПЫТАНИЕ НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ	105
12. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНЕЯ И РОСЫ.....	106
13. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ.....	107
14. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	110
15. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	113
16. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЫЛИ.....	115
17. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ	117

18. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	120
19. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛЯНОГО ТУМАНА	121
20. ИСПЫТАНИЕ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДЫ	121
21. ИСПЫТАНИЕ НА ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТЬ.....	125
22. ИСПЫТАНИЕ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ	126
23. МНОГОФАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ	129
24. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ.....	131
24.1. Испытания на растяжение.....	131
24.2. Испытание на сжатие.....	156
24.3. Испытание на изгиб	159
24.4. Испытание на кручение.....	162
24.5. Испытание на срез	165
25. ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ	166
25.1. Испытания на длительную прочность и ползучесть	166
25.2. Испытания на циклические нагрузки.....	170
25.3. Испытания на ударные нагрузки.....	196
26. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ	210
26.1. Понятие твердости.....	210
26.2. Методы измерения твердости при статическом нагружении.....	212
26.3. Определение твердости по Бринеллю.....	212
26.4. Определение твердости по Виккерсу.....	215
26.5. Определение твердости по Роквеллу	216
26.6. Определение твердости вдавливанием шарика	218
26.7. Определение микротвердости	219
26.8. Определение твердости при динамическом нагружении	220
26.9. Упруго-динамический метод.....	221
26.10. Пластико-динамический метод	222
26.11. Прочие методы определения твердости	223
26.12. Возможности пересчета показателей твердости.....	224
27. ИСПЫТАНИЕ НА ИЗНОС	224
28. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ ИСПЫТАНИЙ.....	225
28.1. Требования к оформлению программы испытаний	227
28.2. Выбор объекта испытаний и определяемых параметров.....	228
28.3. Принцип определения условий испытания и воздействующих факторов.....	228
28.4. Методика испытаний	231
28.5. Пример общих требований к составлению программы испытаний	232
28.6. Планирование испытаний	234
29 АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ.....	236
29.1. Структура автоматизированных систем испытаний	238
30. АККРЕДИТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ.....	243
31. ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	246
31.1. Порядок проведения аттестации	246

31.2. Первичная аттестация испытательного оборудования	247
31.3. Периодическая аттестация испытательного оборудования.....	248
31.4. Повторная аттестация.....	248
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	249
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	250
ПРИЛОЖЕНИЕ Б1.....	251
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	252

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

НД	– нормативная документация
НТД	– нормативно-техническая документация
МИ	– методика испытаний
ПИ	– программа испытаний
СИ	– средство испытаний
АСИ	– автоматизированная система испытаний
ММ	– математическая модель
ТУ	– технические условия
ТТ	– технические требования
ТП	– технологический процесс
КТД	– конструкторско-технологическая документация
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина

ВВЕДЕНИЕ

Испытания являются одним из важнейших этапов жизненного цикла продукта. Проведение испытаний позволяет определить пригодность применения материалов и сырья для изготовления продукции, проконтролировать качество получаемого материала, а также определить возможность использования технологических приемов и методов при изготовлении изделий.

Испытания проводятся на всех этапах жизненного цикла продукта. Правильная организация испытаний позволяет избежать недостоверных результатов и предотвратить выпуск несоответствующей продукции. Важнейшей частью организации испытаний является грамотная разработка и утверждение методик проведения испытаний. Правильно составленная методика проведения испытаний позволяет получать результаты с высокой достоверностью даже при работе персонала с низкой квалификацией.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ОБЛАСТИ ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

По ГОСТ 16504-81 *испытание* – это экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействии. Это определение включает в себя: *оценивание* и (или) *контроль*.

Характеристики свойств объекта при испытаниях могут *оцениваться*, если задачей испытаний является получение количественных или качественных оценок, а могут *контролироваться*, если задачей испытаний является только установление соответствия характеристик объекта заданным требованиям. В этом случае испытания сводятся к контролю, а поэтому часть видов испытаний являются *контрольными*, в процессе которых решается задача контроля

Испытания проводят с целью обеспечения единства измерений, установление рациональной номенклатуры и эффективного использования парка средств измерений, постановки на производство и выпуска средств измерений, которые по своему техническому уровню и качеству соответствуют лучшим отечественным и зарубежным образцам или превышают их.

Важнейшим признаком любых испытаний является принятие на основе их результатов *определенных решений*. Другим признаком испытаний является задание *определенных условий* испытаний (реальных или моделируемых), под

которыми понимается совокупность воздействий на объект и режимов функционирования объекта.

Основными задачами испытаний являются:

- установление соответствия характеристик объекта заданным требованиям (*контроль*);
- получение количественных и качественных оценок свойств объекта (*оценка*).

Условия испытаний (реальные и моделируемые) – совокупность воздействующих факторов (внутренних и внешних) и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. Испытания должны проводиться при *нормальных условиях испытаний*, за которые принимаются условия, установленные нормативной документацией на данный вид продукции.

Испытанию подвергается *объект испытаний* – продукция, подвергаемая испытаниям (единичное изделие, выборка по генеральной совокупности, модель, макет). При проведении испытаний важно воспроизвести требуемые условия испытаний.

Экспериментальное определение характерных свойств объекта при испытаниях может проводиться путем использования измерений, анализов, диагностирования, органолептическими методами, а также путем регистрации определенных событий при испытаниях на надежность (отказы, повреждения) и т.д.

Регистрируемые в процессе испытаний, значения характеристик свойств объекта и условий формируют данные испытаний, которые позволяют получить их результат.

Результатом проведенных испытаний продукции может быть:

- оценка характеристик свойств объекта;
- установление соответствия объекта заданным требованиям;
- результат анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний.

Рассмотрим наиболее распространенные термины и их понятия, встречаемые при описании различных испытаний.

Вид испытаний – классификационная группировка испытаний по определенному признаку.

Категория испытаний – вид испытаний, характеризуемый организационным признаком их проведения и принятием решений по результатам оценки объекта в целом.

Образец для испытаний – продукция или ее часть, или проба, непосредственно подвергаемая эксперименту при испытаниях.

Опытный образец – образец продукции, изготовленный по вновь разработанной рабочей документации для проверки путем испытаний соответствия его заданным техническим требованиям с целью принятия решения о возможности его постановки на производство и использования по назначению.

Модель для испытаний – изделие, процесс, явление, математическая модель, находящаяся в определенном соответствии с объектом испытаний и воздействующими на него факторами, способная замещать их в процессе испытаний.

Макет для испытаний – изделие, представляющее упрощенное воспроизведение объекта испытаний или его части и предназначенное для испытаний.

Метод испытаний – правила применения определенных принципов и средств испытаний.

Объем испытаний – характеристика испытаний, определяемая количеством объектов и видов испытаний, а также суммарной продолжительностью испытаний.

Программа испытаний – обязательный организационно-методический документ, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний (раздел 28).

Методика испытаний – организационно-методический документ обязательный к выполнению. Методика испытаний должна включать следующие разделы:

- область применения и назначение, содержащее определение существенных признаков объекта, характеристики свойств которого подлежат определению;
- нормы и (или) показатели точности данных испытаний, являющиеся количественными характеристиками;
- требования к средствам испытаний, обеспечивающие возможность их взаимодействия требуемых условий испытаний, достижения требуемой точности результатов испытаний;
 - наименование и (или) описание метода испытаний;
 - план испытаний, содержащий критерии прекращения испытаний;
 - нормы расходования материалов для испытаний;
 - описание процедуры и последовательности операций, включая порядок отбора, подготовки и хранения образцов (проб) для испытаний;

- алгоритмы обработки данных испытаний и программы, обработки данных и управления испытаниями с помощью ЭВМ, если таковая предусмотрена;
- правила принятия каждого из предусмотренных возможных выводов и заключения по объекту испытаний;
- требования безопасности и охраны окружающей среды;
- оформление результатов испытаний.

Средство испытаний – техническое устройство, вещество и (или) материал для проведения испытаний.

Испытательное оборудование – средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения условий испытаний.

Оценка пригодности средств испытаний к испытаниям – анализ применяемых средств испытаний (испытательное оборудование, средства измерений, вспомогательные технические устройства) на соответствие требований на само средство испытаний и на конкретную продукцию, подвергаемую испытаниям.

Система испытаний – совокупность средств испытаний, исполнителей и определенных объектов испытаний, взаимодействующих по правилам, установленным соответствующей нормативной документацией.

Точность результатов испытаний – свойство испытаний, характеризуемое близостью результатов испытаний к действительным значениям характеристик объекта, в определенных условиях испытаний.

Воспроизводимость результатов испытаний – характеристика результатов испытаний, определяемая близостью результатов повторных испытаний объекта.

Результат испытаний – оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям по данным испытаний, результаты анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний.

Протокол испытаний – документ, содержащий необходимые сведения об объекте испытаний, применяемых методах, средствах и условиях испытаний, результаты испытаний, а также заключение по результатам испытаний, оформленный в установленном порядке.

Испытательное подразделение – подразделение организации, на которое руководством последней возложено проведение испытаний для своих нужд.

Аттестация испытательных организаций и подразделений – удостоверение компетентности испытательных организаций и подразделений и их оснащенности, обеспечивающих проведение на должном техническом уровне всех предусмотренных нормативно-технической документацией испытаний закрепленных видов продукции и (или) видов испытаний.

Аттестация методики испытаний – определение обеспечиваемых методикой значений показателей точности, достоверности и воспроизводимости результатов испытаний и их соответствия заданным требованиям.

Аттестация испытательного оборудования – определение нормированных точностных характеристик испытательного оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установления пригодности этого оборудования к эксплуатации.

1.1. Соотношение понятий измерений, испытаний и контроля

Измерения, испытание и контроль это основные методы оценки соответствия при сертификационных испытаниях. Особенности их применения определяется задачами, которые решает испытательное оборудование при сертификации продукции. В таблице 1.1 раскрыты цели, показатели точности и качество, которые оцениваются при проведении измерений, испытаний и контроле.

Таблица 1.1

Соотношение понятий измерения, испытания и контроль

<i>Термин</i>	<i>Цель</i>	<i>Качество</i>	<i>Показатель точности</i>
<i>Измерение</i>	Определение значения величины (параметра)	Степень близости результатов измерения к действительным значениям	Погрешность измерения $\Delta_{изм}$
<i>Испытания</i>	Определения значения величины при заданных режимах и воздействующих факторах, определяющих значение величины (параметра)	Степень близости результатов измерения к действительному значению при заданных режимах испытания и воздействующих факторах	Погрешность испытания $\Delta_u = \Delta_p + \Delta_\phi + \Delta_{изм}$
<i>Контроль</i>	Установление нахождения величины (параметра) в заданном допуске при заданных режимах испытания и воздействующих факторах	Степень достоверности нахождения параметров в допустимых пределах	Вероятность ошибок I, II рода с учетом погрешности испытания

1.2. Задачи и виды контроля

Задача контроля – установление соответствия характеристик продукции требованиям, заданных в нормативных документах, в том числе и по результатам испытаний. В зависимости от объекта, контроль может быть:

- контроль продукции;
- контроль услуг;
- контроль систем качества;
- контроль персонала.

Важной характеристикой объектов контроля является *контроль на пригодность*, то есть это свойство конструкции изделия, обеспечивающие возможность удобства и надежность ее контроля при изготовлении, испытании, техническом обслуживании и ремонте.

Виды контроля:

Операционный контроль – это контроль после какой-либо операции на станке, прессе или сборки;

Приемочный контроль;

Контроль комплектности упаковки и транспортировании;

Контроль хранения;

Приемочный контроль проводят по государственным стандартам, общим техническим условиям и соответствующим техническим условиям.

Летучий контроль – срок проведения не регламентирован;

Периодический контроль – проводится через определенный промежуток времени;

Непрерывный контроль – ведется постоянно;

Летучий, периодический и непрерывный контроль осуществляется на стадиях процесса производства.

В зависимости от средств контроля различают:

- *визуальный контроль* – когда объект контроля подвергается осмотру и определяется его соответствие требованиям НД;

- *органолептический контроль* – субъективный метод контроля с помощью органов чувств, проводимый специальными экспертами;

- *инструментальный контроль* – контроль, осуществляемый при помощи измерительного прибора, калибров, стенов, испытательных машин.

В зависимости от объемов продукции различают:

- *сплошной контроль* – проверяют каждую единицу продукции;

- *выборочный контроль* – проверяют выборку из партии.

По характеру воздействия на ход производственного процесса различают:

- *активный контроль;*
- *пассивный контроль.*

При активном контроле результаты контроля используются для непрерывного управления процессом изготовления детали, а при пассивном контроле фиксируется только полученный результат.

По характеру воздействия на объект различают следующие виды контроля:

- *разрушающий контроль;*
- *не разрушающий контроль.*

По типу проверяемых параметров:

- *контроль геометрических параметров;*
- *контроль физических свойств;*
- *контроль механических свойств;*
- *контроль микро и макроструктур;*
- *контроль химических свойств;*
- *специальный контроль на светогазонепроницаемость, на герметичность и др.*

Испытание продукции – это первая из разновидностей контроля, поэтому испытаниям присущ системный метод.

Таблица 1.2

Систематизация видов контроля по основным признакам

Признаки вида контроля	Вид контроля
1. Стадия создания и существования продукции	Производственный, эксплуатационный
2. Этап процесса производства	Входной, операционный, приемочный, инспекционный
3. Полнота охвата контроля	Сплошной, выборочный, летучий, непрерывный, периодический
4. Влияние на объект контроля	Разрушающий, неразрушающий
5. Применение средств контроля	Измерительный, регистрирующий, органолептический, визуальный, технический осмотр

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗДЕЛИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Все современные машины, агрегаты и приборы эксплуатируются в сложных условиях, характеризующихся широким диапазоном режимов работы, давлением, условиями радиации, ростом нагрузок, скоростей и длительности эксплуатации.

К основным воздействующим факторам относят:

- механические;
- климатические;
- биологические;
- специальные среды;
- ионизирующие и электромагнитные излучения.

Воздействия, оказывающие влияния на изделия, материалы и сырье, различают по ряду признаков и разделяют на *внутренние* и *внешние* воздействия.

Внешние воздействия, в свою очередь, можно разделить на:

- температурные воздействия;
- воздействия климатических, механических, космических факторов в естественных условиях и в условиях применения на объекте.

2.1. Климатические воздействия

Факторами, определяющие климатические воздействия на объекты испытания, являются: температура, влажность, давление. При этом в процессе климатических испытаний аппаратуры, температурный режим может устанавливаться повышенный 50...80 °С (для аппаратуры в условиях эксплуатации) и режим пониженной температуры от +5 до –40 °С(условия хранения).

При таких испытаниях влажность среды может устанавливаться: пониженная – «сухая» и повышенная – «мокрая» до 98 % и выше; точка росы – точка конденсации пара; наличие дождя.

Объекты испытаний проверяются также на гидроустойчивость (раздел 18). При испытаниях на воздействие повышенного или пониженного давления проводят наблюдения за техническим состоянием аппаратуры, не разрушая материала.

Совокупное воздействие климатических факторов – воздействие, например, температуры и влажности, как правило, проводят в форсированном режи-

ме. Подробно испытания на воздействие климатических факторов рассмотрены в разделах 12 – 15, 18 – 20.

2.2. Механические воздействия

В зависимости от механических воздействий на аппаратуру, материалы или изделия, испытания можно разделить:

- на разрушающие и неразрушающие;
- на прочность и разрушение;
- на критическую нагрузку;
- на разрыв – растяжение;
- на сжатие и изгиб;
- на кручение;
- на излом;
- на сдвиг;
- на удар;
- на воздействие вибрации – гармонической, случайной, стохастической, негармонической;
- на центробежные нагрузки или ускорения;
- испытание на прочность и жесткость.

Характеристиками, по которым оценивается прочность металлов и сплавов, являются (раздел 24):

- условный предел упругости $\delta_{\text{усл}}$;
- физический предел пропорциональности $\delta_{\text{пл}}$;
- условный предел пропорциональности $\delta_{\text{усл. пл}}$;
- физический предел текучести $\delta_{\text{т}}$;
- условный предел текучести – $\delta_{0,2}$ (0,2 % – величина остаточной деформации);
- предел прочности (выносливости) $\delta_{\text{в}}$;
- сопротивление разрушению (истинное сопротивление разрыва) $S_{\text{к}}$.

Свойства металлов принято оценивать относительным удлинением δ , и относительным сужением Ψ . Все эти величины оцениваются после разрыва.

Относительное удлинение – абсолютное увеличение длины образца, отнесенное к его первоначальному состоянию.

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\% .$$

Относительное сужение – абсолютное уменьшение площади поперечного сужения образца после разрыва S_1 , отнесенное к его первоначальной площади S_0

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100\%$$

Все механические свойства изделий тесно связаны с механическими свойствами материала, из которого изготовлены узлы и детали.

Основными видами разрушения при воздействии механических факторов являются:

отрыв – разрушение вследствие отрыва под действием растягивающих напряжений или удлинений;

срез – разрушение вследствие среза под действием касательных напряжений;

растяжение – разрушение материала при одноосном нагружении на разрыв.

Эти испытания используют при разработке новых материалов для оценки однородности свойств металлов различных сплавов и при оценке термической обработки деталей.

Многие строительные (кирпич, бетон, камень) и малопластичные (чугун, сталь) материалы в процессе эксплуатации подвергаются сжатию.

Сжатие – это процесс обратный растяжению. Величина нагрузки при сжатии достигает до 10^8 Н. Отличием, испытаний материалов на сжатие от испытаний на растяжение, является то, что многие материалы весьма значительно деформируются без разрушения на конечной стадии испытания. Результаты испытаний на сжатие существенно зависят от отношения высоты образца к его диаметру, а также от величины трения между опорами и торцами образца.

При испытаниях на сжатие определяются следующие характеристики:

- модуль нормальной упругости;
- физический предел пропорциональности;
- условный предел текучести;
- предел прочности;
- относительное укорочение;
- скорость испытания на сжатие.

Изгиб – одна из самых распространенных нагрузок, используемая для определения механических свойств хрупких и малопластичных материалов, чувствительных к перекосу.

При испытании на изгиб применяют два вида нагружения образца:

- первый вид – через жесткую траверсу двумя силами, приложенными на равных расстояниях от опор;

- второй вид – изгибное нагружение, которое вызывает неравномерное распределение нагрузки по всему сечению образца.

Кручение – это нагрузка, испытываемая деталями, не передающими крутящий момент. На скручивание испытывают цилиндрические образцы, а также образцы, имеющие в поперечном сечении сложную форму (квадрат, швеллер, и т.п.). Предельный крутящий момент – 6 кН/м .

Все виды механических воздействий на испытываемые объекты рассмотрены в разделах 24 – 27.

2.3. Биологические воздействия

Биологические воздействия разделяют:

-на механические, вызывающие макроразрушения при контакте:

- а) столкновение – олени, лоси, люди, птицы и т.д.;
- б) прогрызание – мыши, термиты;
- в) уничтожение;

-на воздействия, ухудшающие эксплуатационные свойства объектов, в результате:

- а) биозагрязнения;
- б) биозасорения;
- в) биообрастание: плесень, мох, деревья, плющ;

-биохимическое разрушение:

- а) биологические повреждения в процессе питания – грибы;
- б) химическое воздействие выделяющихся веществ, например водорода (H_2), плесень выделяет органическую кислоту;
- в) физико-химическая коррозия на границе материала-организма, плесень, грызуны, микроорганизмы, вирусы и бактерии.

Необходимо учитывать хорошую приспособляемость микроорганизмов к изменениям параметров окружающей среды, влияние на их рост температуры, влажности, давления, кислотности и других факторов. Наиболее сильное влия-

ние на рост организмов оказывает температура. Размеры организмов существенно влияют на их активность. Увеличение отношения поверхности к объему у микроорганизмов обуславливает высокую скорость протекания реакций, т.е. интенсивность обмена веществ и роста.

По отношению к использованию воздуха для выработки клеточной энергии различают аэробные (основными являются окислительные реакции, в которых акцептор водорода – кислород) и анаэробные (без свободного кислорода) условия жизни и развития организмов.

Бактерии – самая многочисленная и распространенная группа микроорганизмов, имеющих одноклеточное строение. Большинство видов бактерий существует за счет мертвых органических остатков. Одной из особенностей микроорганизмов является их способность к спорообразованию. Споры у бактерий образуются при неблагоприятных условиях существования (недостатке питательных веществ, высушивании, изменении *pH* среды и т.д.), причем из одной клетки формируется только одна спора. Образование спор у бактерий не связано с процессом размножения, а является приспособлением к выживанию в неблагоприятных условиях внешней среды. Размножение бактерий осуществляется путем деления.

Плесневые грибы отличаются от бактерий более сложным строением и более совершенным способом размножения спорами. Клетки грибов (гифы) образуют переплетения и ветвления, называемые мицелием. Грибы способны вырабатывать клеточную энергию только за счет энергии химических реакций. Мицелий и споры грибов образуют хорошо окрашенные колонии, заметные невооруженным глазом. Для грибковых образований оптимальными условиями развития являются: относительная влажность воздуха, которая составляет 85 %; температура 25 – 30 °С; застой воздуха.

При испытаниях материалов, применяемых в производстве изделий, на микологических площадках, расположенных в различных климатических зонах РФ, за три года было выделено 585 штаммов плесневых грибов, принадлежащих 166 видам и 52 родам из классов: фикомицетов, аскомицетов, базидиомицетов и несовершенных грибов. Испытания на воздействие плесневых грибов рассмотрены в разделе 17.

Родовой состав грибов, поражающих полимерные материалы в климатических районах России, приведен в приложении к ГОСТ 9.048–75.

Микроорганизмы обладают богатым ферментативным аппаратом. Они способны в зависимости от условий синтезировать нужный фермент или использовать ферменты другого организма при отсутствии нужного собственного. Вредящая деятельность микроорганизмов в основном связана с выделением экзоферментов и продуктов метаболизма: аминокислот и органических кислот.

2.3.1. Действие микроорганизмов на материалы и изделия изделий

Наиболее агрессивными метаболитами микроорганизмов являются органические кислоты (известно около 30 органических кислот, синтезирующихся плесневыми грибами), окислительно-восстановительные и гидролитические экзоферменты. Благодаря микроскопическим размерам, гифы и споры проникают в углубления и трещины материала, вызывая изменения массы, водопоглощение и степени гидрофобности. Обрастание микроорганизмами зависит от химического состава и строения материала, микрофлоры окружающей среды, наличия загрязнений (органических и неорганических) в воздухе, климатических условий и избирательности действия сообществ организмов.

Поверхностное воздействие плесневых грибов за счет конденсации влаги и повышения температуры приводит к коротким замыканиям между токоведущими частями плат. Органические кислоты и другие метаболиты обладают высокой проводимостью. В результате чего, снижаются удельные объемное и поверхностное сопротивления, увеличивается *тангенс угла диэлектрических потерь* ($tg\delta$), уменьшаются пределы механической прочности материалов при растяжении и изгибе. Обрастание сплавов свинца, алюминия и стали ведет к интенсивному растворению зерен металлов (исследование проводилось с применением электронного микроскопа).

Оптические изделия из стекла подвергаются разрушению плесневыми грибами из-за растворения продуктами метаболитов. На совершенно чистой поверхности стекла рост грибов не наблюдается, однако в производстве невозможно достичь высокой чистоты. Рост плесневых грибов лучше идет на нейтральных стеклах (например, кварцевом) и хуже на стеклах со щелочной реакцией. Даже умеренный рост микроорганизмов представляет серьезную проблему, так как снижает контрастность изображения, создает нежелательное рассеивание света. Споры попадают на стекла при сборке оптических приборов. Стекла поражаются *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Penicillium*, *Mucor*, *Rhizopus* и т.д.

Обработка печатных плат продуктами метаболизма в 10–12 раз снижает тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$). Действие аспергилов и пеницилов

увеличивает на несколько порядков переходное сопротивление контактов и на 20... 30 % – контактное сопротивление у кабельных изделий.

Таблица 2.1

Классификация биоповреждений

<i>Процесс повреждения материала</i>	<i>Характер повреждения</i>	<i>Пример</i>
Прямое разрушение микроорганизмами	Ассимиляция ингредиентов материалов бактериями и грибами	Повреждение полимерных материалов в атмосферных явлениях
Химическое разрушение	Воздействие продуктов жизнедеятельности микроорганизмов в токопроводящих средах	Повреждение материалов при контакте с топливом и маслами
Коррозионное разрушение	Воздействие в токопроводящих средах (биокоррозия)	Повреждение материалов в водных средах
Комбинированное разрушение	Комплексное воздействие микроорганизма продуктами их жизнедеятельности	Повреждение металлоконструкций в специфических условиях эксплуатации

Как уже отмечалось, углеродистые стали разрушаются сульфатредуцирующими бактериями. Так же действуют на сталь и тионовые бактерии. Силикатные бактерии разлагают алюмосиликаты: слюду, калиевое стекло, превращая калий в водорастворимые соединения.

Наибольшее влияние оказывают микроорганизмы на органические субстраты, поскольку используют их в качестве источников углерода. Это могут быть пластмассы, краски, следы смазки, остатки флюсов, растворителей, пота рук, адсорбированные органические частицы из воздуха цеха или склада. Отметим, что в воздухе производственных помещений число колоний микроорганизмов в пять раз меньше, чем при хранении на открытом воздухе, и в три раза меньше, чем на складах. Благоприятное действие оказывает аэрация воздуха производственных помещений.

Наибольшее разрушение бывает у пластмасс, дерева, кожи.

Плесень образует на поверхности водную пленку, которая способствует химическому разложению и потере важнейших свойств изделия, так же плесень образуется, когда внутри закрытых или полузакрытых изделий создают специальный микроклимат.

К насекомым относятся: *термиты*, так как у них самая большая прожорливость, а также *муравьи*, *тараканы* и др.

Для проводов и кабелей опасность представляет *грызуны*. В морской воде разъедают дерево *черви*.

Защиту от биологического воздействия осуществляют *химическими и конструктивными методами*. Химические яды и покрытия используются для защиты от плесневых образований и грибков, а также от насекомых. Наиболее эффективная защита с помощью *конструктивных мер*. В конструктивные меры входит замена материалов, склонных к образованию грибковых плесеней или изменение относительной влажности и создание специальных защитных оболочек.

2.4. Космические воздействия

Наиболее существенными факторами, оказывающими влияние на изделия, являются:

- глубокий космический вакуум;
- корпускулярное излучение (потoki ядер гелия);
- метеорные частицы; • захламленность космоса;
- радиационные пояса земли (воздействия электромагнитных полей высокой мощности);
- перепад температур на солнечной и теневой стороне (+120 °С; –90 °С) при орбитальных космических полетах.

Космические условия характеризуются совокупностью воздействий космической среды, к которым относятся: глубокий вакуум, невесомость, температура (чаще сверхнизкая), электромагнитные и корпускулярные излучения, наличие метеорных частиц, магнитных и гравитационных полей планет и звезд и т.д.

Воздействие факторов космического пространства на конструкционные материалы и элементы изделий происходит на фоне определяющего фактора – давления *глубокого космического вакуума*, обусловленного сильной разреженностью среды. Глубокий вакуум характеризуется длиной свободного пробега молекул газа, соизмеримой с характеристическими линейными размерами космического аппарата или испытательной вакуумной камеры.

При изучении параметров космических условий выделяют три среды: межзвездную, межпланетную атмосферу планет и их спутников.

Межзвездная среда состоит из межзвездного газа и мельчайших твердых частиц – пыли, заполняющих пространство между звездами в галактиках. Газ почти равномерно перемешан с пылью.

Межзвездная среда вблизи Солнца переходит в межпланетную среду.

Межпланетная среда заполняет пространство между планетами Солнечной системы. Она состоит из расширяющегося вещества солнечной короны (примерно 90 % составляют ионизированные атомы водорода и около 9 % – атомы гелия), несущего увлекаемое веществом магнитное поле.

2.5. Ионизирующие и электромагнитные воздействия

Изделия космической и ядерной техники подвергаются воздействию ионизирующих излучений создающих при взаимодействии с веществом заряженные атомы и молекулы. Кроме этого вызывают повреждения гамма-излучения, электронные и протонные излучения, альфа-частицы.

Ионизирующее излучение, в самом общем смысле, это различные виды микрочастиц физических полей, способные ионизировать вещество. В более узком смысле к ионизирующему излучению не относят ультрафиолетовое излучение и излучение видимого диапазона света, которое в отдельных случаях также может быть ионизирующим. Излучение микроволнового и радиодиапазонов не является ионизирующим [4, 5, 6, 7]. Наиболее значимы следующие типы ионизирующего излучения:

- коротковолновое электромагнитное излучение (рентгеновское и гамма-излучения);
- потоки заряженных частиц (бета-частицы электронов и позитронов), альфа-частиц ядер атома гелия-4, протонов, мюонов, нейтронов и др.

В природе ионизирующее излучение обычно генерируется в результате спонтанного радиоактивного распада радионуклидов ядерных реакций (синтез и индуцированное деление ядер, захват протонов, нейтронов, альфа-частиц), а также при ускорении заряженных частиц в космосе (природа такого ускорения космических частиц до конца не ясна). Искусственными источниками ионизирующего излучения являются искусственные радионуклиды (генерируют альфа-, бета- и гамма-излучения), ядерные реакторы (генерируют главным образом нейтронное и гамма-излучение), радионуклидные нейтронные источники, ускорители элементарных частиц (генерируют потоки заряженных частиц, тормозное фотонное излучение), рентгеновские аппараты (генерируют тормозное рентгеновское излучение).

По механизму взаимодействия с веществом выделяют непосредственно (потоки заряженных частиц) и косвенно ионизирующее излучение (потоки нейтральных элементарных частиц – фотонов и нейтронов). По механизму образо-

вания – первичное (рожденное в источнике) и вторичное (образованное в результате взаимодействия излучения другого типа с веществом) ионизирующее излучение.

Энергия частиц ионизирующего излучения лежит в диапазоне от нескольких сотен электрон-вольт (рентгеновское излучение, бета-излучение некоторых радионуклидов) до $10^{15} - 10^{20}$ эВ и выше – (протоны космического излучения, для которых не обнаружено верхнего предела по энергии).

Альфа-излучение представляет собой поток альфа-частиц – ядер гелия-4. Альфа-частицы, рождающиеся при радиоактивном распаде, могут быть легко остановлены листом бумаги. Бета-излучение это поток электронов, возникающих при бета-распаде. Для защиты от бета-частиц энергией до 1 МэВ достаточно алюминиевой пластины толщиной в несколько миллиметров. Гамма-излучение обладает гораздо большей проникающей способностью, поскольку состоит из высокоэнергетических фотонов, не обладающих зарядом. Для защиты от их воздействия эффективны тяжелые элементы (свинец и т.д.), поглощающие МэВ-ные фотоны в слое толщиной несколько сантиметров. Проникающая способность всех видов ионизирующего излучения зависит от энергии.

Наибольшую опасность представляют поток нейтронов и гамма-излучение. Влияние данных факторов усиливается в зависимости от их интенсивности и времени воздействия. *Проникающая радиация* вызывает постепенное необратимое изменение электрических, механических, химических веществ материала. *Импульсивная радиация*, действующая короткое время ($10^{-7} - 10^{-3}$ сек) приводит к изменению электрофизических свойств изделий, а из-за большой плотности, создаваемой ионизацией, может вызвать и обратимые изменения электрических характеристик изделий. Большие дозы облучения нейтронами повышают твердость углеродистой стали на 40 %, коррозионную стойкость стали на 100 %, а никеля на 40 %.

Изменение химических, механических, электрических свойств материала в условиях воздействия ионизирующих излучений требуются знание специальной испытательной техники, разработки стойких конструкций и материалов, применение специализированной радиоактивной технологии.

Одним из видов внешнего воздействия являются *электромагнитные поля*, которые могут вызвать изменения режимов работы электронной аппаратуры. Эти поля создаются специальными излучателями, например радиолокационными излучателями, а также мощными электроустановками (подъемные краны и т.д.)

2.6. Специальные среды

К специальным средам относят: пары химических веществ, химические растворы (дезинфицирующие, дезактивирующие, дегазирующие), кислоты и газы.

Изделия, предназначенные для работы в *специальных средах*, должны обладать повышенной стойкостью и для проверки проводятся специальные испытания. Для сокращения времени испытаний увеличивают концентрацию химически активных компонентов среды воздействия, повышают относительную влажность и температуру.

Испытательное оборудование должно обеспечивать концентрацию активной среды, температуру, относительную влажность и специальные среды. Длительность испытаний должна соответствовать длительности воздействия на аппаратуру специальных сред, параметры испытательного режима, количественные и качественные характеристики этих сред в условиях эксплуатации.

Для борьбы с воздействиями специальных сред предусматривают специальные конструктивные исполнения изделия. Применяют кислотостойкие покрытия и создают такие условия эксплуатации, при которых воздействие среды становится наиболее незаметными.

Вопросы для самоконтроля

1. Как классифицируют внешние воздействующие факторы?
2. Какие воздействия относятся к климатическим?
3. Какие воздействия относятся к космическим?
4. Какие воздействия относят к механическим?
5. Виды ионизирующих излучений.
6. Что относится к специальным средам?

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Все применяемые методы испытаний классифицируются на две большие группы:

- физические испытания реальных изделий или макетов;
- испытания с использованием моделей.

Физические испытания могут проводиться как при внешних воздействующих факторах, создаваемых искусственным путем с помощью испытательных стендов (*стендовые испытания*) или специальных методов и средств, при-

меняемых в лабораторных условиях (*лабораторные испытания*), так и при естественных внешних воздействующих факторов.

Лабораторные и стендовые испытания изделий отличаются от реальной эксплуатации тем, что при их проведении пока еще не представляется возможным моделировать все внешние воздействия одновременно в той случайной совокупности, которая имеет место при реальной эксплуатации. Обычно при лабораторных и стендовых испытаниях аппаратура подвергается воздействию одной или нескольких определенных нагрузок. Это приводит к результатам, несколько отличающимся от полученных при реальной эксплуатации. Поэтому при исследовании влияния внешних воздействующих факторов наряду с лабораторными и стендовыми испытаниями проводятся также испытания изделий в естественных условиях окружающей среды.

В зависимости от условий и места проведения испытаний при воздействии естественных внешних факторов различают *полигонные и натурные* испытания изделий.

Полигонные испытания объекта проводят на специально оборудованном полигоне. Широко распространены полигонные испытания изделий, проводимые при воздействии внешних климатических факторов. При этом испытания изделий, предназначенных для эксплуатации и хранения только в ограниченных климатических районах, проводят на полигонах, расположенных в пунктах, характеризующих, климатическое воздействие этих районов.

Натурные испытания объекта реализуются при выполнении трех основных условий:

1) испытаниям подвергается непосредственно изготовленное изделие (т.е. объект испытания) без применения моделей или составных частей аппаратуры;

2) испытания проводятся в условиях и при воздействиях на изделия, соответствующих условиям и воздействиям при их использовании по целевому назначению;

3) определяемые характеристики свойств объекта испытаний измеряются непосредственно без использования аналитических зависимостей, отражающих физическую структуру объекта испытаний и его составных частей. При этом допускается применение математического аппарата статистической обработки экспериментальных данных.

К натурным испытаниям относится, в частности, опытная эксплуатация изделий.

Цель полигонных и натурных испытаний – исследование комплексного влияния естественно воздействующих факторов на изменение параметров, свойств и механизмы отказов изделий при их эксплуатации и хранении. Эти испытания обеспечивают получение наиболее полной и достоверной информации:

- о комплексном влиянии факторов окружающей среды на параметры, характеризующие изделий;

- позволяют исследовать характер реальных физико-химических процессов, протекающих в материалах и комплектующих изделиях при воздействии естественных внешних факторов;

- дают возможность уточнять данные, полученные при испытании объекта под воздействием внешних факторов, создаваемых искусственным путем, а также нормы на допустимые изменения параметров (критерии годности).

По результатам полигонных и натурных испытаний разрабатывают рекомендации по способам защиты изделий от внешних воздействующих факторов.

Однако специфика натурных испытаний заключается в их большой продолжительности, сложности и высокой стоимости. Эти испытания требуют четкой их организации и оптимального планирования. С целью ограничения объема испытаний программа их проведения должна базироваться на анализе результатов эксплуатации, лабораторных и стендовых испытаний, а также требований; предъявляемых к изделиям. Это позволяет проводить испытание объекта только в тех естественных условиях, в которых влияние дестабилизирующих факторов наиболее интенсивно.

К физическим испытаниям при естественных внешних воздействующих факторах следует отнести также *эксплуатационные* испытания, т.е. испытания объекта, проводимые при эксплуатации. Одним из основных видов эксплуатационных испытаний является *опытная* эксплуатация изделий. Иногда проводится *подконтрольная* эксплуатация, которая условно может быть отнесена к эксплуатационным испытаниям. При подготовке к подконтрольной эксплуатации специально предназначенный для ее проведения персонал, руководствуясь специально разработанной документацией, осуществляет сбор, учет и первичную обработку информации.

Испытания с использованием моделей осуществляются *методами физического и математического моделирования*. Применение этих методов позволяет отказаться от ряда сложных физических испытаний реальных изделий или их макетов.

Физическое моделирование заключается в том, что первичный параметр объекта испытаний (процесс в элементе схемы или какое-либо внешнее воздействие) заменяется простой физической моделью, способной имитировать изменения данного параметра. Физическое моделирование может осуществляться также следующими статистическими методами испытаний.

1. *Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)* заключается в том, что при помощи многократных случайных испытаний (вычислений, производимых над случайными числами) определяют вероятность появления некоторого случайного события (математического ожидания случайной величины). Данный метод позволяет определить характеристики надежности, исходя из предположения, что известен механизм отказов при различных сочетаниях значений параметров изделий, выбираемых случайным образом согласно заданной статистической модели.

2. *Метод статистических испытаний физическим моделированием* объекта предусматривает проведение испытаний на реальных объектах или их электронных моделях. При испытаниях на реальных объектах производят исследование возможных причин возникновения отказов изделий и их последствий путем искусственного введения в схему обрывов, коротких замыканий или установки комплектующих элементов с параметрами, выходящими за допустимые нормы. Проведение испытаний на электронных моделях объекта заключается в том, что определенные комплектующие элементы схемы заменяются физическими моделями, позволяющими изменять величины характеризующих их параметров. Моделирование различных элементов осуществляют на специальных стендах, где воспроизводят случайные процессы изменения параметров комплектующих элементов.

Математическое моделирование базируется на использовании уравнений, связывающих входные и выходные параметры объекта испытаний. (В предыдущем методе такая связь реализуется непосредственно в физической модели.) Эти уравнения выводят на основании изучения конкретной изделий и ее внутренних функциональных связей, после чего и осуществляют математическое описание установленных связей с учетом воздействия различных факторов на изделия.

Основной недостаток метода – необходимость проведения огромного объема теоретических и экспериментальных исследований для определения соотношений, характеризующих математическую модель объекта, что требует при-

менения ЭВМ с высоким быстродействием и большим объемом памяти, а также – знания вероятностных характеристик первичных (входных) параметров. Необходимость проведения огромного объема экспериментальных исследований, техническая сложность выполнения физических моделей целого ряда устройств (например, высокочастотных, импульсных и др.), высокая стоимость, и длительность проведения испытаний не стимулируют широкого применения методов физического и математического моделирования в практике испытаний изделий и поэтому здесь подробно не рассматриваются.

Частным видом статистических методов испытаний, применяемым на практике, являются граничные испытания изделий.

Граничные испытания проводятся для определения зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров объекта и режимом эксплуатации. Они являются экспериментальным методом, основанным на физическом моделировании области значений первичных параметров, при которых выходные параметры изделий находятся в пределах допуска, т.е. в области безотказной работы изделий при изменениях первичных параметров. Однако определить область безотказной работы изделий при одновременном изменении многих первичных параметров не представляется возможным. Поэтому часто на практике находят граничные точки области безотказной работы изделий при изменении какого-либо одного первичного параметра изделий (параметр граничных испытаний), сохраняя значения других неизменными. В этом и состоит смысл граничных испытаний.

Для реализации метода граничных испытаний используют изменение выходного параметра изделий с помощью искусственных приемов, например, меняют одно из питающих напряжений, выбранное в качестве первичного параметра граничных испытаний. Границы области, в пределах которой изделие работает безотказно, определяются при изменении напряжения до момента отказа изделий по исследуемому выходному параметру в случае, когда остальные первичные параметры изделий имеют номинальные (или заданные) значения. Затем при некотором отклонении одного из первичных параметров изделий от номинального (или заданного) значения снова наблюдают за выходным параметром изделий при изменении напряжения. Ясно, что при отклонении первичного параметра в обе стороны от номинального значения выходной параметр будет выходить за пределы допуска при различных значениях напряжения.

Исследовательские испытания проводятся для изучения определенных характеристик свойств объекта и их целью являются:

- определение или оценка показателей качества функционирования, испытываемого объекта в определенных условиях его применения;
- выбор наилучших режимов работы объекта или наилучших характеристик свойств объекта;
- сравнение множества вариантов реализации объекта при проектировании и аттестации;
- построение математической модели функционирования объекта (оценка параметров математической модели);
- отбор существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования объекта;
- выбор вида математической модели объекта (из заданного множества вариантов).

Примером исследовательских испытаний могут быть рассмотренные испытания моделей. Особенностью исследовательских испытаний является факультативный характер их проведения, и они, как правило, не применяются при сдаче готовой продукции.

Определительные испытания проводят для определения значений характеристик объекта с заданными значениями показателей точности и достоверности.

Сравнительные испытания проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов. На практике иногда возникает необходимость сравнить качество аналогичных по характеристикам или даже одинаковых изделий, но выпускаемых различными предприятиями. Для этого испытывают сравниваемые объекты в идентичных условиях. Сравнительные испытания проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов.

Контрольные испытания проводятся для контроля качества объекта. Испытания этого вида составляют наиболее многочисленную группу испытаний.

На этапе проектирования проводят *доводочные, предварительные и приемочные* испытания (рис. 3.1).

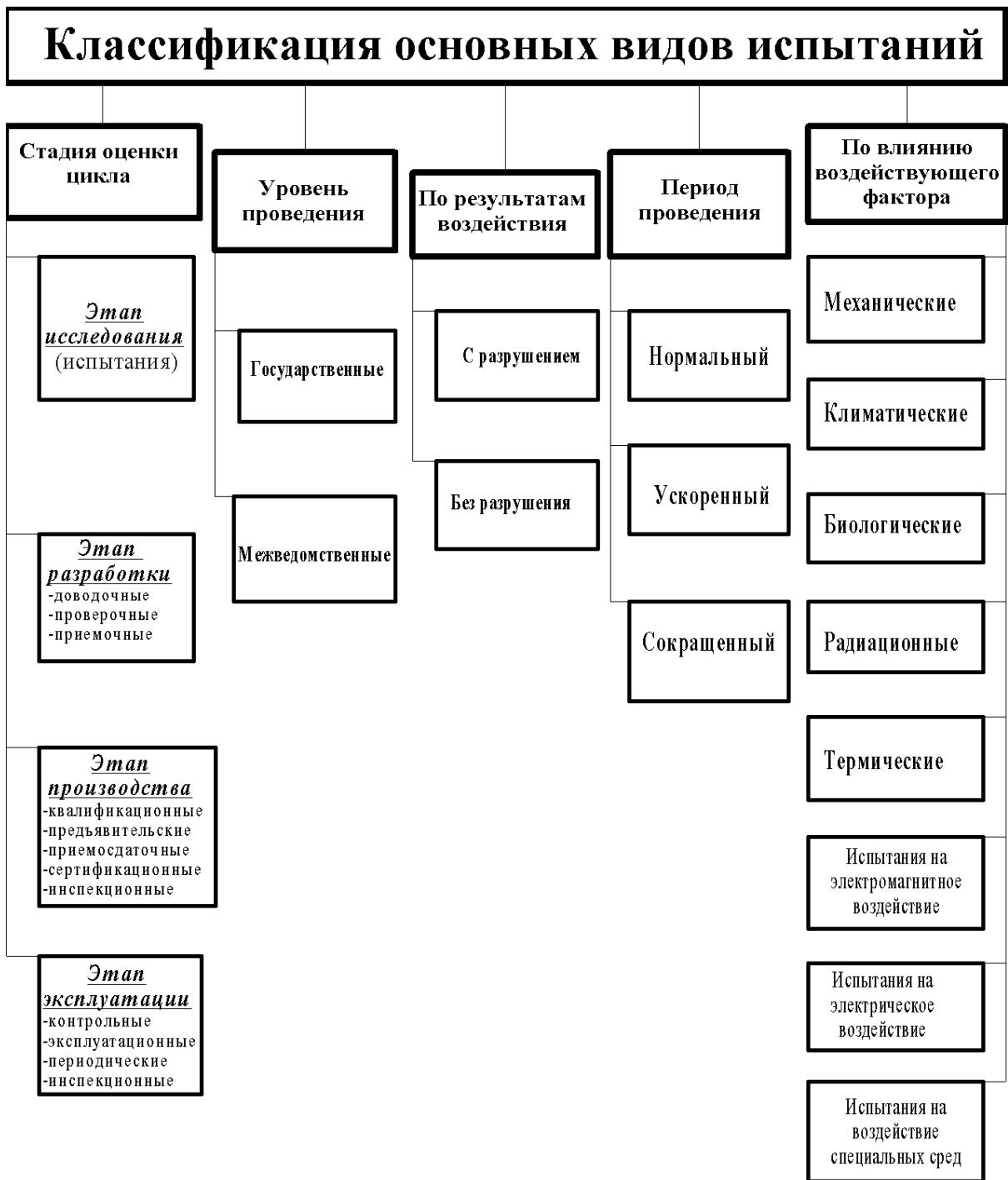


Рис. 3.1. Классификация основных видов испытаний

К испытаниям готовой продукции относятся: *квалификационные, предъявительские, приемосдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные* (рис. 3.1).

Так, *доводочные* испытания – это исследовательские испытания, проводимые при проектировании изделий с целью оценки влияния вносимых в нее изменений для достижения заданных значений показателей качества, а *предварительные* испытания являются контрольными испытаниями опытных образцов и

(или) опытных партий продукции с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

Приемочные испытания также являются контрольными испытаниями. Это испытания опытных образцов, опытных партий продукции или изделий единичного производства, проводимые для решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции (изделий) на производство и (или) использования ее по назначению. Приемочные испытания опытных образцов или партий изделий проводятся, как правило, для решения вопроса о целесообразности постановки аппаратуры на производство, а приемочные испытания изделий единичного производства – для решения вопроса о целесообразности передачи этих изделий в эксплуатацию.

Квалификационные испытания проводятся уже на установочной серии или первой промышленной партии изделий, т.е. на стадии освоения производства изделий. Целью их является оценка готовности предприятия к выпуску продукции данного типа в заданном объеме.

Предъявительские испытания изделий проводятся обязательно службой технического контроля предприятия-изготовителя перед предъявлением ее для приемки представителем заказчика, потребителем или другими органами приемки.

Приемосдаточные испытания проводятся в освоенном производстве. Это контрольные испытания изготовленной продукции при приемном контроле. Приемосдаточные испытания, как правило, проводятся изготовителем продукции. Если на предприятии-изготовителе имеется представитель заказчика, приемосдаточные испытания проводятся им в присутствии представителя-изготовителя.

С целью контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска проводят *периодические* испытания продукции в объеме и в сроки, установленные нормативно-техническими документами (НТД).

Инспекционные испытания – это особый вид контрольных испытаний. Они проводятся в выборочном порядке с целью контроля над стабильностью качества установленных видов продукции специально уполномоченными организациями. В тех случаях, когда в производственном процессе выявляют недостатки конструкции изделий или технологического процесса ее изготовления, возникает необходимость совершенствования конструкции или техпроцесса.

Целесообразность предложенных изменений выявляют с помощью типовых испытаний. *Типовые испытания* – это контрольные испытания выпускаемой продукции, проводимые с целью оценки эффективности и целесообразно-

сти вносимых изменений в конструкцию, рецептуру или технологический процесс.

Электронная аппаратура, машины и приборы могут оцениваться по категориям качества или на соответствие их характеристик требованиям национальных и международных стандартов. Неотъемлемой процедурой такой оценки являются *аттестационные или сертификационные испытания*. Испытания, проводимые для оценки уровня качества продукции при ее аттестации по категориям качества, называются *аттестационными*.

Сертификационные испытания – это контрольные испытания продукции, проводимые с целью установления соответствия характеристик ее свойств национальным и (или) международным НД.

Измерения, испытание и контроль это основные методы оценки соответствия при сертификационных испытаниях. Особенности их применения определяется задачами, которые решает испытательное оборудование при сертификации продукции. Соотношение понятий измерение, испытание и контроль показано в таблице 1.1.

Важной характеристикой объектов контроля является *контроль на пригодность*, то есть это свойство конструкции изделия, обеспечивающее возможность удобства и надежность ее контроля при изготовлении, испытании, техническом обслуживании и ремонте.

В зависимости от продолжительности все испытания подразделяются на нормальные, ускоренные, сокращенные.

Под *нормальными* испытаниями изделий понимаются испытания, методы и условия, проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации.

В свою очередь, *ускоренные* испытания – это такие испытания, методы и условия, проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о качестве изделий в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях. В НТД на методы испытаний конкретных видов изделий указываются значения воздействующих факторов и режимы функционирования, соответствующие нормальным условиям испытаний. Обычно нормальными считаются условия, характеризуемые температурой окружающей среды $18...38\text{ }^{\circ}\text{C}$, атмосферным давлением $8,4 \cdot 10^4 \dots 10,7 \cdot 10^4$ Па и относительной влажностью $48...80\%$.

Сокращенные испытания проводятся по сокращенной программе.

В зависимости от уровня значимости испытаний изделий их можно разделить на государственные, межведомственные и ведомственные.

К *государственным* испытаниям относятся испытания установленных важнейших видов продукции, проводимые головной организацией по государственным испытаниям, или приемочные испытания, проводимые государственной комиссией или испытательной организацией, которой предоставлено право их проведения.

Межведомственные испытания – это испытания изделий, проводимые комиссией из представителей нескольких заинтересованных министерств и ведомств, или приемочные испытания установленных видов продукции для приемки составных ее частей, разрабатываемых совместно несколькими ведомствами.

Ведомственные испытания проводятся комиссией из представителей заинтересованного министерства или ведомства или корпорации.

Допускается совмещать следующие категории испытаний:

- предварительные с доводочными;
- приемочные с приемосдаточными (для единичного производства);
- приемочные с квалификационными (для серийного производства);
- периодические с типовыми (при согласии с заказчика);
- сертификационные с приемочными и периодическими.

Вопросы для самоконтроля

1. Как разделяют физические испытания?
2. Как разделяют испытания с использованием моделей?
3. Какие испытания называют натурными?
4. Какие испытания называют полигонными?
5. Какие испытания называют сертификационными?
6. Что такое государственные испытания?
7. Дайте общую классификацию испытаний.

4. СПОСОБЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

В настоящее время в лабораторных и стендовых испытаниях применяются следующие способы их проведения: *последовательный, параллельный, последовательно-параллельный и комбинированный*.

При *последовательном* способе один и тот же объект испытания последовательно подвергается всем предусмотренным программой видам испытаний. Исключение составляют испытания, проводимые при воздействии большинства химических и биологических внешних воздействующих факторах. Эти испытания, как правило, проводятся на различных выборках. Последовательность ис-

пытаний предусматривает обычно первоочередное выявление наиболее грубых дефектов аппаратуры, таких как ошибки маркировки, наличие коротких замыканий и обрывов при проведении, например, приемосдаточных испытаний.

Важным условием проведения последовательных испытаний является соблюдение определенного порядка воздействия внешних факторов. Иногда при составлении программы предусматривают такую последовательность внешних воздействующих факторов на объект, согласно которой вначале действуют наиболее сильно влияющие на данный объект внешние факторы. Это делается для скорейшего выявления потенциально ненадежных образцов с целью сокращения времени испытаний. Однако при этом теряется большая часть информации о влиянии других видов факторов, которая могла быть получена при их воздействии. Поэтому чаще на практике рекомендуется начинать испытания с воздействия на объект наименее жестких внешних факторов, при которых воздействие будет наименьшим. Такой способ испытаний позволяет точнее определить причины наблюдаемых отказов и составить более полную картину о наличии в объекте потенциальных дефектов. С другой стороны, если наиболее опасные для объекта внешние воздействующие факторы расположить в конце последовательных испытаний, то значительно увеличивается время их проведения.

Как видно, последовательность проведения испытаний электронной аппаратуры, машин и станков играет важную роль. Установление единой последовательности проведения испытаний для различных объектов вряд ли оправдано. Оптимальная последовательность проведения испытаний зависит от назначения объекта, места его установки и предполагаемых условий эксплуатации. Поэтому последовательность проведения испытаний для конкретного объекта указывается в технических условиях или программе испытаний. В то же время рекомендуется, например, перед проверкой герметичности и влагоустойчивости электронной аппаратуры проводить механические испытания, способные вызвать разгерметизацию аппаратуры. И вообще, все климатические испытания по этой же причине целесообразно проводить после механических испытаний.

Характерной особенностью последовательного способа проведения испытаний является наличие эффекта накопления деградационных изменений в физической структуре объекта испытаний по мере перехода от одного вида внешнего воздействующего фактора к другому. В результате чего каждое воздействие предыдущего фактора оказывает влияние на результаты испытаний при воздействии последующего, что, в свою очередь, усложняет интерпретацию результатов испытаний и увеличивает износ объекта.

При *параллельном* способе проведения испытаний образец подвергается одновременному воздействию различных внешних воздействующих факторов одновременно (параллельно) на нескольких выборках. Такой способ позволяет получить большой объем информации за значительно более короткий промежуток времени, чем последовательный, при минимальном износе испытываемых образцов. Однако параллельный способ требует существенно большего числа испытываемых изделий, чем последовательный.

Последовательно-параллельный способ, позволяющий в каждом конкретном случае более эффективно использовать преимущества того или иного способа и находить наиболее оптимальные варианты их сочетания. При последовательно-параллельном способе все изделия, отобранные для испытаний, разбиваются на несколько групп, которые испытываются параллельно. В каждой из групп испытания проводят последовательным способом. В данном случае все виды испытаний должны быть разбиты также на группы, число которых равно числу групп испытываемых изделий. По своему составу группы испытаний формируются по видам испытаний из тех соображений, чтобы, с одной стороны, продолжительность испытаний во всех группах была примерно одинаковой, а с другой, чтобы условия проведения объединенных в одну группу видов испытаний были близки к реальным. В то же время испытания на грибоустойчивость, на длительное воздействие тепла и морского тумана, на воздействие солнечной радиации часто рекомендуется проводить на образцах, не подвергшихся другим видам механических и климатических воздействий.

Однако каждый из рассмотренных способов проведения испытаний предусматривает, как правило, раздельное воздействие на объект внешних факторов, что является существенным отличием от реальных условий его эксплуатации. Поскольку при лабораторных и стендовых испытаниях практически невозможно имитировать реальные условия эксплуатации объекта, ограничиваются определенным комплексом стандартных испытаний. Простые и универсальные, они сложились на эмпирических принципах. Не имитируя реальных условий эксплуатации, они позволяют получать информацию, необходимую для уверенности в том, что вновь разрабатываемые изделия будут обладать в эксплуатации не худшими характеристиками, чем предшествующие изделия.

С целью приближения лабораторных условий испытаний объекта к реальным условиям его эксплуатации все большее распространение начинает получать комбинированный способ испытаний, при котором на объект испытания одновременно воздействуют несколько внешних факторов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие существуют способы проведения испытаний?
2. В чем преимущества и недостатки последовательного проведения испытаний?
3. В чем преимущества и недостатки параллельного проведения испытаний?
4. В чем особенности последовательно-параллельного проведения испытаний?

5. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИСПЫТАНИЙ

Многие испытания в большинстве случаев проводятся для оценки функциональных показателей, условия испытания к способности воздействия внешних факторов и критериям надежности. Сертификационные испытания на надежность проводят для оценки показателей надежности продукции технического применения. Под **надежностью объекта** понимается – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

В зависимости от свойств объекта (ГОСТ 27.002 – 89) различают следующие показатели надежности:

- безотказность;
- долговечность;
- ремонтпригодность;
- сохраняемость.

Безотказность – это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность состояния в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность – это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтпригодность – это свойство объекта сохранять и восстанавливать работоспособность состояния путем технического восстановления и ремонта.

Сохраняемость – это свойство объекта сохранять значения показателя безотказности, долговечности, ремонтпригодности в течение срока хранения, после него и транспортирования.

Срок сохраняемости – продолжительность пребывания объекта в режимах хранения и транспортирования, при которых значения безотказности, ремонтпригодности и долговечности объекта остаются в допустимых пределах.

Различают сохраняемость объекта: *до ввода в эксплуатацию* и *в процессе эксплуатации*.

Техническое состояние – совокупность свойств объекта, технологической системы, подверженных изменению в процессе работы, которые характеризуются установленными признаками – критериями состояния.

В соответствии с ГОСТ 27.002 – 89 различают следующие виды технического состояния:

- работоспособное;
- неработоспособное;
- исправное;
- неисправное;
- предельное.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической, конструкторской и технологической документации.

Неработоспособное состояние – это состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и конструкторско-технологической документации.

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации.

Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и конструкторской документации.

Различия между терминами работоспособное и исправное состояния удобно рассмотреть на металлорежущем станке. Частоты вращения шпинделя, перемещения суппортов, уровень шума, тепловыделения, энергопотребления и другие характеристики станка регламентированы конструкторско-технической документацией, ГОСТами, требованиями СНиП и др. Представим, что в результате нарушения системы смазки станок стал сильнее шуметь, греться и потреблять больше энергии. Из-за того что значения данных показателей выходят за допустимые пределы станок считается *неисправным*, тем не менее он продолжает обработку деталей требуемого качества, а потому считается *работоспособным*. Если при дальнейшей работе происходит поломка станка, в результате которой он осуществляет обработку ненадлежащего качества либо совсем

не способен производить обработку, то такой станок становится *неработоспособным*.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация или восстановление его работоспособного состояния невозможны или нецелесообразны.

Предельное состояние любого объекта, в том числе и металлорежущего оборудования, определяется на основании экономических расчетов. Эти расчеты опираются на сравнение затрат на изготовление станка $Q_{и}$ и его эксплуатацию $Q_{э}$ с той прибылью $Q_{п}$, которую дает станок при его использовании (рис.5.1). Суммарная эффективность станка Q зависит от времени T и имеет экстремум.

Она связана с надежностью, так как с течением времени возрастают затраты на ремонт и техническое обслуживание станка из-за его физического изнашивания, а связанные с этим простои снижают положительный эффект от использования станка по назначению. Поэтому имеет место нелинейная зависимость $Q_{э}$ и $Q_{п}$ от времени. Срок окупаемости нового станка $T_{ок}$ наступит при $Q_{и} + Q_{э}(T) = Q_{п}(T)$, и с этого момента станок начнет давать прибыль. После достижения максимума $Q(T_{max})$ эффективность станка начинает снижаться из-за возрастания эксплуатационных потерь, и когда прибыль и потери сравниваются, при $T = T_{пр}$, наступит предельное состояние станка.

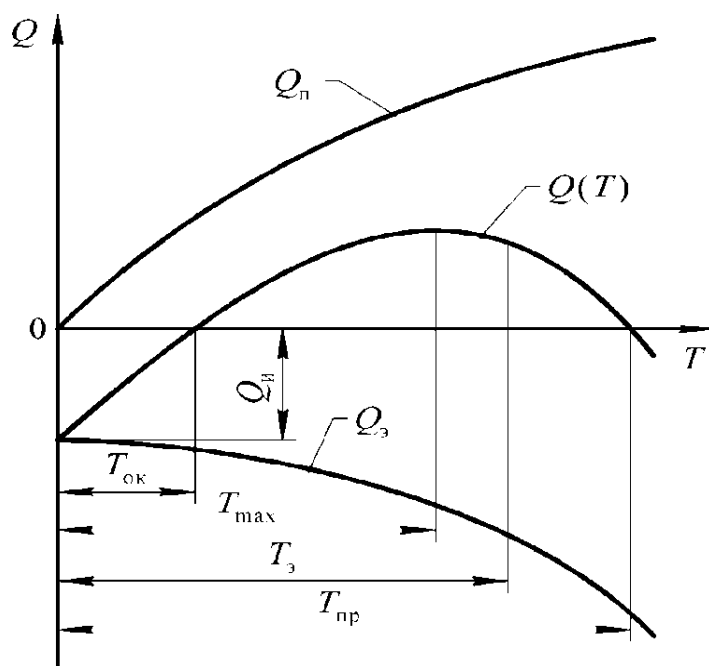


Рис.5.1. Изменение экономической эффективности станка во времени

Экономически целесообразная длительность эксплуатации станка $T_э$, находится в пределах $T_{\max} \leq T_э < T_{\text{пр}}$. Чем выше надежность станка, тем выше экономический эффект от его использования и тем продолжительнее период его рациональной эксплуатации.

5.1. Повреждения и отказы

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния технологической системы при сохранении работоспособного состояния.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния.

Сбой – самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора. Например, застревание заготовки в транспортном лотке автоматической линии

По характеру нарушения работоспособности различают функциональный и параметрический отказы.

Функциональный отказ – отказ технологической системы, в результате которого наступает прекращение ее функционирования, не предусмотренное регламентированными условиями производства или конструкторской документации.

Функциональный отказ наступает в результате разрушения деталей станка, приспособления, инструмента, что приводит к невозможности выполнения, например, формообразующих движений резания или транспортировки заготовки. Полностью исключить функциональные отказы невозможно, но большая часть функциональных отказов является следствием ошибок при конструировании, изготовлении или назначении условий эксплуатации технологической системы.

Параметрический отказ – отказ, при котором технологическая система продолжает функционировать, но происходит выход значений одного или нескольких выходных параметров системы за пределы, установленные в нормативно-технической, конструкторской и технологической документации.

На технологическую систему воздействует ряд внешних факторов (механические, тепловые, вибрационные и др.), вызывающих повреждения и изменяющих значения выходных параметров (снижается точность, нарушается стабильность работы), которые со временем выходят за допустимые пределы.

5.2. Временные понятия

Наработка – продолжительность или объем работы технологической системы.

Единицы измерения наработки могут быть временные (часы, минуты) и штучные (количество произведенных изделий, число рабочих циклов, число запусков и др.).

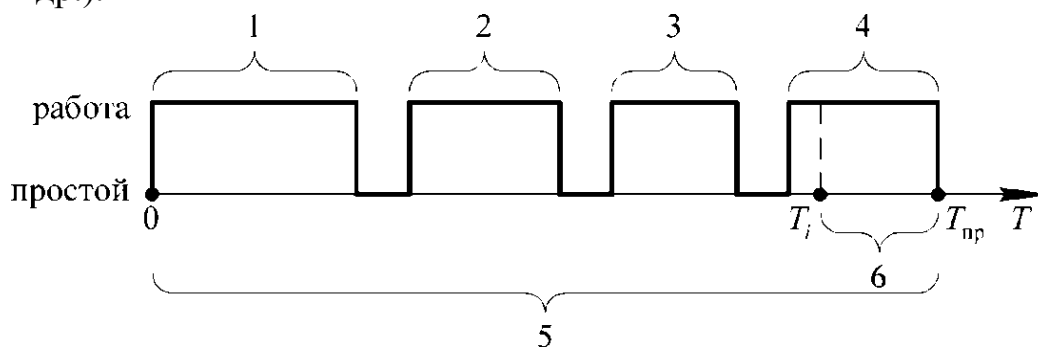


Рис.5.2. Временные понятия: 1 – наработка до отказа; 2, 3, 4 – наработка на отказ; 5 – срок службы; 6 – остаточный ресурс

Наработка до отказа – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа (поз. 1 рис.5.2).

Наработка на отказ или *наработка между отказами* – наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа (поз. 2, 3 и 4 рис. 5.2).

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние (поз. 1+2+3+4 рис.5.2).

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние $T_{пр}$ (поз. 5 рис.5.2).

Остаточный ресурс – это суммарная наработка от момента T_i определения технического состояния объекта до перехода в предельное состояние $T_{пр}$ (поз. 6 рис.5.2).

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния. Назначенный ресурс выбирается на основе показателей надежности и используется для предупреждения повреждений системы, проведения подробной диагностики и профилактических мероприятий.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определения понятий надежности, характеризующих состояние объекта и его элементов: надежность, работоспособное и неработоспособное состояния, отказ, критерий отказа, повреждение, исправное и предельное состояния, функциональный и параметрический отказы, параметрическая надежность станка и инструмента.
2. Дайте определение временных показателей надежности: наработка, наработка до отказа, ресурс, остаточный ресурс, срок службы, назначенный ресурс, назначенная наработка.

5.3. Количественные показатели надежности объекта, как технологической системы

Состояние технологической системы характеризуется совокупностью значений выходных параметров (точность и шероховатость обработанной детали, производительность, стоимостью обработки и др.). Выход значения одного из параметров за пределы, установленные в технической документации, означает отказ. Значения данных параметров зависят от множества случайных факторов, физических явлений, а также повреждений, возникающих в технологической системе при ее функционировании. В связи с этим случайный характер будут иметь, значения выходных параметров, а соответственно, время, через которое параметр достигнет своего предельного состояния. По этой причине для оценки надежности системы используются методы теории вероятностей и статистики.

В общем случае, их применяют для исследования изделий крупносерийного и массового производства. Применение статистической теории надежности к единичным и мелкосерийным объектам ограничено. Тем не менее, если объект единичного и мелкосерийного производства состоит из совокупности объектов крупносерийного производства, то его надежность будет определяться надежностью отдельных элементов, а потому допускается применение статистических методов.

Для количественной оценки надежности технологической системы применяют следующие основные показатели:

- наработка до отказа и на отказ, вероятность безотказной работы и вероятность отказа, интенсивность отказов, параметр потока отказов;
- ресурс и срок службы;
- вероятность, интенсивность, трудоемкость и время восстановления;
- срок сохраняемости;
- коэффициент готовности, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения эффективности.

5.4. Нарботка до отказа и на отказ. Вероятность безотказной работы и вероятность отказа. Интенсивность отказов. Параметр потока отказов

Смысл показателей наработка до отказа и на отказ уже был раскрыт при рассмотрении временных понятий. Как и говорилось ранее, под действием случайных факторов время наработки T технологической системы до отказа и на отказ будут величинами случайными.

Среднюю наработку до отказа T_1 вычисляют по формуле:

$$T_1 = \int_0^{\infty} T \cdot f(T) \cdot dT = \int_0^{\infty} (1 - F(T)) \cdot dT = \int_0^{\infty} P(T) \cdot dT, \quad (5.1)$$

где, $f(T)$ – плотность распределения наработки до отказа;

$F(T)$ и $P(T)$ – вероятности отказа и безотказной работы.

Среднюю наработку на отказ находят следующим образом:

$$T = \frac{T_{\Sigma}}{M\{n(T_{\Sigma})\}}, \quad (5.2)$$

где, T_{Σ} – суммарная наработка;

$M\{n(T_{\Sigma})\}$ – математическое ожидание числа отказов, наступивших в течение суммарной наработки;

Статистические средние наработки до отказа и на отказ можно найти по следующим формулам:

$$\bar{T}_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \tau_j, \quad (5.3)$$

где, N – число рассматриваемых объектов;

τ_j – наработка до первого отказа каждого из объектов.

$$\bar{T} = \frac{T_{\Sigma}}{n(T_{\Sigma})}, \quad (5.4)$$

где, $n(T_{\Sigma})$ – число отказов, фактически происшедших за суммарную наработку T_{Σ} ;

Пример 1: Завод приобрел 10 одинаковых станков. После выработки их ресурса был составлен табель наработок на отказ:

Номер станка	Нарботка, тыс. часов					$\sum_{i=1}^5 T_{ij}$
	T_{1j}	T_{2j}	T_{3j}	T_{4j}	T_{5j}	

1	1,5	2,0	2,2	2,5	2,4	10,6
2	1,4	2,1	2,0	1,8	1,8	9,1
3	1,3	2,3	2,1	2,4	2,3	10,4
4	1,2	2,2	2,3	1,9	2,2	9,8
5	1,0	1,8	1,8	2,3	2,5	9,4
6	1,1	1,9	1,9	2,0	2,1	9,0
7	1,6	2,0	2,0	2,2	2,0	9,8
8	1,7	1,7	2,3	2,1	1,9	9,7
9	1,1	1,5	2,1	2,0	1,9	8,6
10	1,3	1,6	2,2	2,3	2,0	9,4
$\sum_{j=1}^{10} T_{ij}$	13,2	19,1	20,9	21,5	21,1	$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{10} T_{ij} = 95,8$

Определить: а) среднюю наработку до отказа; б) среднюю наработку на отказ для всей партии станков.

а) средняя наработка до отказа – это наработка до возникновения первого отказа

$$\bar{T}_1 = \frac{\sum_{j=1}^{10} T_{1j}}{10} = \frac{13,2}{10} = 1,32 \text{ тыс. час}$$

б) средняя наработка на отказ – это среднее (для всей партии станков) время работы между отказами

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{10} T_{ij}}{n(T_\Sigma)} = \frac{95,8}{50} = 1,916 \text{ тыс. час}$$

Со случайной величиной наработки связана вероятность $P(T)$ безотказной работы. Вероятность $P(T)$ безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Обратной величиной вероятности $P(T)$ безотказной работы является вероятность отказа $F(T)$, которая показывает вероятность того что в пределах заданной наработки возникнет отказ объекта:

$$F(T) = 1 - P(T) \quad (5.5)$$

Вероятности $F(T)$ и $P(T)$ – величины нормированные от 0 до 1, так $F(T)=0$ и $P(T)=1$ соответствует технологической системе с абсолютной надежностью (идеальный случай), а $F(T)=1$ и $P(T)=0$ – система неработоспособна.

Закон распределения наработки до отказа обладает следующими свойствами:

- с течением времени вероятность возникновения отказа увеличивается, при $T_2 > T_1$, $F(T_2) > F(T_1)$;

- в начальный момент времени работы технологической системы вероятность возникновения отказа приближается к нулю, при $T_i \rightarrow 0$, $F(T) \rightarrow 0$;

- технологическая система не может работать вечно, при $T_i \rightarrow \infty$, $F(T) \rightarrow 1$.

Анализ данных свойств позволяет установить, что график функции $F(T)$ – график неубывающей функции, значения которой начинаются от нуля и достигают единицы (рис.4). Если принять T_i как время определения состояния технологической системы, то событие $T \leq T_i$ означает отказ в течение времени T_i , а вероятность $F(T \leq T_i)$ – вероятность отказа за время T_i . Говоря о вероятности безотказной работы, имеется в виду, что отказ произойдет за время большее T_i , т.е. данному случаю соответствует событие $T > T_i$.

Статистически вероятность отказа за время T_i определяется как отношение числа отказов $n(T_i)$ с наработкой до отказа менее T_i к общему числу рассматриваемых объектов N :

$$\bar{F}(T_i) = \frac{n(T_i)}{N} \quad (5.6)$$

Пример 2: В испытаниях на надежность участвовало 20 одинаковых станков. Первый станок вышел из строя через 500 часов работы, по истечении 1000 часов нерабочими были уже 2 станка, еще через 1000 часов из строя вышло дополнительно 3 станка, еще через 1000 часов – еще 5 станка. Определить: а) вероятность отказа через 3000 часов; б) вероятность безотказной работы через 2000 часов.

$$а) \bar{F}(3000) = \frac{2+3+5}{20} = 0,5 \text{ или } 50\%; \quad б) \bar{F}(2000) = 1 - \frac{2+3}{20} = 0,75 \text{ или } 75\%$$

На рис. 5.3 показаны зависимости $P(T)$ и $F(T)$, точка их пересечения определяет среднюю наработку до отказа. В этой точке $P(T) = F(T) = 0,5$.

Каждой технологической системе в зависимости от ее надежности соответствуют свои кривые $P(T)$ и $F(T)$. Для более надежной – кривые $P_2(T)$ и $F_2(T)$. Это означает, что при $T < T_2$ вероятность отказов приближается к 0, а вероятность безотказной работы приближается к 1.

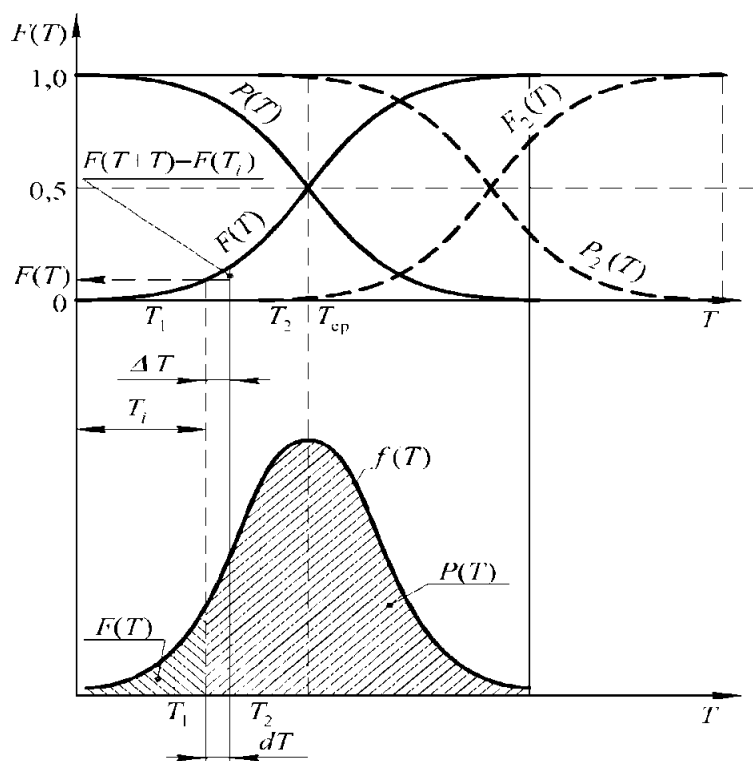


Рис. 5.3. Функции распределения и плотность распределения наработки до отказа

Вероятность безотказной работы в течение времени T_i может быть найдена через плотность распределения случайной величины – наработки до отказа. Функция плотности распределения $f(T)$ является производной функции распределения $F(T)$ и характеризует плотность, с которой распределяются значения наработки до отказа технологической системы:

$$F(T_i) = \int_0^{T_i} f(T) \cdot dT \quad (5.7)$$

Для определения показателя безотказности плотность распределения наработки до отказа получают в результате статистических исследований.

Еще одним показателем безотказности является *гамма-процентная наработка до отказа*, отображающая наработку, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах:

$$P(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100} \quad (5.8)$$

Данная величина является обратной по смыслу для вероятности безотказной работы. Так, например, можно сказать: «вероятность безотказной работы за время функционирования станка 10 000 часов составляет 85 %» или «с вероятностью 85 % станок отработает 10 000 часов». В первом случае речь идет о ве-

роятности безотказной работы, во втором – о гамма-процентной наработке на отказ.

Для анализа причин отказов определяют такой показатель надежности, как *интенсивность отказов* $\lambda(T)$ – вероятность отказа в единицу времени ΔT после времени T при условии, что до этого времени отказов не было. Интенсивность отказов выражают формулой

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{P(T)} \quad (5.9)$$

Для определения статистической оценки интенсивности отказов используют следующие формулы:

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{n(\Delta T)}{N_{cp}(\Delta T) \cdot \Delta T} \quad (5.10)$$

где, $n(\Delta T)$ – число отказов, случившихся в промежуток времени ΔT ;

$N_{cp}(\Delta T)$ – среднее число случаев безотказной работы в промежуток времени ΔT ;

$$N_{cp}(\Delta T) = \frac{N(T) + N(T + \Delta T)}{2} \quad (5.11)$$

где, $N(T)$ и $N(T + \Delta T)$ – число случаев безотказной работы, соответственно, в начале и конце интервала ΔT .

Пример 3: На рабочее место станочника поступила партия резцов – 50 шт. В результате работы часть из них вышла из строя, при этом 5 из них проработали 10 часов, 10 проработали 15 часов, 20 проработали 20 часов, 5 проработали 24 часа, остальные остались целыми. Определить интенсивность отказов в промежутке времени а) 15-20 часов; б) 20-24 часов.

$$а) N_{cp}(5) = \frac{N(15) + N(20)}{2} = \frac{50 - 5 + 50 - 5 - 10}{2} = 40 \text{ шт}$$

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{10}{40 \cdot 5} = 0,05 \frac{1}{\text{час}} = 5 \frac{\%}{\text{час}}$$

$$б) N_{cp}(5) = \frac{N(20) + N(24)}{2} = \frac{50 - 5 - 10 + 50 - 5 - 10 - 20}{2} = 25 \text{ шт}$$

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{20}{25 \cdot 4} = 0,2 \frac{1}{\text{час}} = 20 \frac{\%}{\text{час}}$$

Зависимость интенсивности отказов от времени может иметь три зоны, каждая из которых отображает особенности отказов, изменяющиеся с течением времени работы объектов (рис. 5.4).

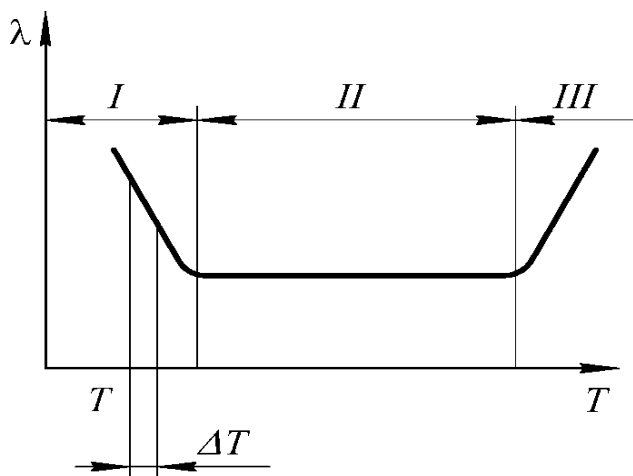


Рис. 5.4. Зависимость интенсивности отказов от времени

Зона I – зона приработки, где $\lambda(T + \Delta T) < \lambda(T)$. Высокая интенсивность отказов, уменьшающаяся с течением времени, связана с наличием дефектов, приобретенных при изготовлении объектов. Происходит отбор ненадежных объектов.

Зона III – зона предельного состояния системы, где $\lambda(T + \Delta T) > \lambda(T)$. Повышение интенсивности отказов связано с повреждениями, приобретенными при эксплуатации за длительный период времени.

Зона II – основной участок работы, где $\lambda(T + \Delta T) = \lambda(T)$. Интенсивность отказов стабильна и отказы носят в основном случайный характер.

Таким образом, склонность элементов технологической системы к изменению состояния с течением времени работы удобно оценивать зависимостью $\lambda(T)$. Если объект испытания обладает низкой надежностью и в нем часто возникают отказы (т.е. $F(T) \rightarrow 1$), то для выявления их причин используется параметр потока отказов, показывающий число отказов в единицу времени:

$$\mu(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{M\{n(\Delta T)\}}{\Delta T}, \quad (5.12)$$

где, $M\{n(\Delta T)\}$ – математическое ожидание количества отказов, возникших в промежутке времени ΔT .

Статистический аналог параметра потока отказов находится по формуле:

$$\bar{\mu}(T) = \frac{n(T_2) - n(T_1)}{T_2 - T_1} = \frac{1}{\bar{T}}, \quad (5.13)$$

Пример 4: для условий примера 1 определить параметр потока отказов.

$$\bar{\mu}(T) = \frac{1}{\bar{T}} = \frac{1}{1,916} = 0,522 \text{ тыс. часов}^{-1} = 5,22 \cdot 10^{-4} \text{ часов}^{-1}$$

5.5. Ресурс и срок службы

Группа данных показателей относится к *параметрам долговечности* и включает в себя гамма-процентный ресурс $T_{\gamma p}$, средний ресурс \bar{T}_p , гамма-процентный срок службы $T_{\gamma cc}$ и средний срок службы \bar{T}_{cc} .

Гамма-процентный ресурс и гамма-процентный срок службы – суммарная наработка и календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

$$P(T_{\gamma p, cc}) = \frac{\gamma_{\gamma p, cc}}{100} \quad (5.14)$$

Средний ресурс и средний срок службы – математическое ожидание, соответственно, ресурса и срока службы.

$$\bar{T}_{cp(p, cc)} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N T_{(p, cc)j} \quad (5.15)$$

где N – количество рассматриваемых объектов;

$T_{(p, cc)j}$ – ресурс (или срок службы) j -го объекта.

Пример 5: для условий примера 1 определить средний ресурс и средний срок службы, если время восстановления работоспособного состояния станка составляет 100 часов и станки работают в 3 смены без перерывов и выходных (1 смена = 8 часов).

$$\bar{T}_p = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{10} T_{ij}}{N} = \frac{95,8}{10} = 9,58 \text{ тыс. часов}$$

$$\bar{T}_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{10} T_{ij}}{N} + 0,1 \cdot (n(T_{\Sigma}) - 1) = \frac{95,8}{10} + 0,1 \cdot 4 = 9,98 \text{ тыс. часов} = 1 \text{ год } 1 \text{ месяц } 21 \text{ день}$$

5.6. Вероятность, интенсивность, трудоемкость и время восстановления

Вероятность восстановления, гамма-процентное время восстановления, среднее время восстановления, интенсивность восстановления, средняя трудоемкость восстановления являются *показателями ремонтпригодности*.

Вероятность восстановления – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение.

В понятии «вероятность восстановления» подразумевается, что объект будет восстановлен в любом случае, при этом время восстановления не превысит заданного значения с определенной вероятностью.

Гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ .

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Определяется как отношение количества восстановленных объектов в единицу времени к среднему количеству объектов, находящихся в не восстановленном состоянии.

Формула для статистического определения интенсивности восстановления выглядит следующим образом:

$$\bar{\lambda}_B(T) = \frac{n_B(\Delta T)}{N_{н.ср} \cdot \Delta T}, \quad (5.16)$$

где, $n_B(\Delta T)$ – количество восстановленных объектов на интервале ΔT ;

$N_{н.ср}$ – среднее количество объектов, находящихся в не восстановленном состоянии на интервале ΔT .

Отличия понятий *времени и трудоемкости восстановления* заключается в том, что время включает в себя все этапы восстановления, в том числе снятие (установку) неисправного (починенного) объекта, заказ или изготовление новых деталей для проведения восстановления объекта, а также время на испытательные работы. *Трудоемкостью* является затраченное рабочим время на выполнение определенных работ, т.е. это затраты живого труда на выполнение одного конкретного этапа.

Показатели данной группы находятся по формулам аналогичным описанным ранее.

5.7. Срок сохраняемости

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

5.8. Коэффициент готовности, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения эффективности

Коэффициенты, рассматриваемых в данной группе показателей, являются комплексными, т.е. характеризуют не менее двух свойств, составляющих надежность объекта.

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{i=1}^n T_{Bi}} = \frac{T_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}} + T_{\text{в.ср}}}, \quad (5.17)$$

где, T_i и $T_{\text{ср}}$ – наработка на i -й отказ и средняя наработка на отказ;

T_{Bi} и $T_{\text{в.ср}}$ – время восстановления после i -го отказа и среднее время восстановления.

Зависимость коэффициента готовности от времени восстановления затрудняет оценку надежности объекта, так как по K_{Γ} нельзя судить о времени непрерывной работы до отказа. К примеру, для одного и того же численного значения K_{Γ} интервалы T_i и T_{Bi} могут как большими так и маленькими.

Коэффициент готовности является удобной характеристикой для объектов, которые предназначены для длительного функционирования, а решают поставленную задачу в течение короткого промежутка времени (находятся в ждущем режиме), например, различные реле электрозащиты.

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению

не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

$$K_{ог} = K_{г} \cdot P(\Delta T) \quad (5.18)$$

где $K_{г}$ – коэффициент готовности;

$P(\Delta T)$ – вероятность безотказной работы объекта в течение времени ΔT , необходимого для безотказного использования по назначению.

Коэффициент технического использования – отношение суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к суммарному времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период:

$$K_{ти} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{i=1}^n T_{Ви} + \sum_{j=1}^m T_{профj}}, \quad (5.19)$$

где T_i – наработка объекта на i -й отказ;

$T_{Ви}$ – время восстановления объекта после i -го отказа; $T_{профj}$ – длительность выполнения j -й профилактики, требующей вывода объекта из работающего состояния;

n – количество отказов и восстановлений в рассматриваемый промежуток времени;

m – количество профилактик, требующих остановки объекта и вывода его из работающего состояния.

Как видно из выражения (5.19), коэффициент технического использования $K_{ти}$ характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации. Следовательно, $K_{ти}$ отличается от $K_{г}$ тем, что при его определении учитывается все время вынужденных простоев, тогда как при определении $K_{г}$ время простоя, связанное с проведением профилактических работ, не учитывается.

Вынужденные простои объекта обычно происходят по следующим причинам:

- поиск и устранение отказа;
- регулировка и настройка объекта после устранения отказа;
- простой из-за отсутствия запасных элементов;
- профилактические работы.

Пример 6: для таблицы примера 1, время восстановления T_{Bi} после первого отказа составляет 1 % от наработки до отказа, после второго отказа – 2 % от наработки на 2-ой отказ, после третьего – 3 % и т.д. За период эксплуатации станков было проведено 3 профилактики, каждая заняла 100 часов. Определить коэффициенты готовности $K_{Г}$ и технического использования $K_{ТИ}$ для каждого из станков.

$$K_{Г1} = \frac{\sum_{i=1}^5 T_{i1}}{\sum_{i=1}^5 T_{i1} + (0,01 \cdot T_{11} + 0,02 \cdot T_{21} + 0,03 \cdot T_{31} + 0,04 \cdot T_{41})} =$$

$$= \frac{10,6}{10,6 + (1,5 \cdot 0,01 + 2,0 \cdot 0,02 + 2,2 \cdot 0,03 + 2,5 \cdot 0,04)} \cdot 100\% = 97,96\%$$

$$K_{ТИ1} = \frac{\sum_{i=1}^5 T_{i1}}{\sum_{i=1}^5 T_{i1} + \sum_{i=1}^4 T_{Bi} + \sum_{j=1}^3 T_{профj1}} = \frac{10,6}{10,6 + 0,221 + 0,1 \cdot 3} \cdot 100\% = 95,32\%$$

Таблица 5.1

Коэффициентов готовности технического использования

Номер станка	$K_{Г}$	$K_{ТИ}$
1	97,96	95,32
2	97,98	94,91
3	97,95	95,26
4	97,99	95,14
5	98,00	95,03
6	97,98	94,88
7	97,96	95,11
8	97,94	95,06
9	97,91	94,67
10	97,89	94,92

Коэффициент сохранения эффективности – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную

продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

$$K_{сэ} = \frac{ПЭ_{ф}(\Delta T)}{ПЭ_{н}(\Delta T)}, \quad (5.20)$$

Так например для металлорежущего оборудования, являющегося частью технологической системы, его показатели эффективности должны быть связаны с производительностью труда и затратами труда при обработке деталей.

Данный коэффициент характеризует степень влияния отказов на эффективность его применения по назначению. Для каждого конкретного типа объектов содержание понятия эффективности и точный смысл показателей эффективности задается техническим заданием и вводится в нормативно-техническую и конструкторскую документацию.

6. ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Результатом определительных испытаний на надежность являются количественные значения показателей надежности объектов, установленные с заданной точностью и (или) достоверностью.

При определительных испытаниях на надёжность объекты могут быть: *восстанавливаемые и невосстанавливаемые.*

Основными этапами испытаний на надёжность являются:

- планирование;
- организация и проведение испытаний;
- обработка полученной информации.

Планирование включает в себя установленные правила отбора образцов, определение объёма выборки, продолжительность времени испытаний, выбор критериев приёмки и отбраковки.

Организация проведения испытаний включает в себя регламентации порядка и условий испытаний, осуществление контроля над наблюдаемыми параметрами в процессе испытаний, фиксации отказов, форму учётов доходов и т.д.

По характеру оценок показателей надежности определительные испытания различают (рис. 6.1):

- испытания с целью определения точечных оценок *средних значений* показателей надежности (средняя наработка до отказа, средний ресурс, среднее время восстановления и пр.);

- точечной оценкой определяемого показателя в этих испытаниях является среднее арифметическое значение показателя, наблюдаемое при испытаниях выборки из партии однородных объектов;

- испытания с целью определения *доверительного интервала* возможных значений показателя надежности, который с заданной доверительной вероятностью покрывает математическое ожидание этого показателя.



Рис. 6.1. Классификация определительных испытаний на надежность

По исходным данным различают:

- прямые испытания, основанные на использовании информации об отказах объекта;

- испытания, основанные на использовании *косвенных признаков отказа* (перегрев, уровни вибрации, шума и пр.);

Определительные и контрольные испытания различают по планам их проведения.

План испытаний – правила, устанавливающие объем выборки, порядок проведения испытаний и критерии их прекращения.

Планы испытаний имеют условные буквенные обозначения по типу:

[N	X	X]
Признак объема выборки	Признак восстанавливаемости объекта	Признак окончания испытания

Расшифровка признаков восстанавливаемости объекта испытаний:

U – объекты невосстанавливаемые и незаменимые в случае отказа;

R – невосстанавливаемые, но заменяемые в случае отказа новыми идентичными отказавшим экземплярам объекты;

M – восстанавливаемые в случае отказа объекты.

Расшифровка признаков окончания испытания:

T – устанавливается время или наработка;

T_Σ – устанавливается суммарная наработка всех объектов;

N – до отказа всех испытываемых объектов;

r – устанавливается число отказавших объектов;

(r, T) – испытание прекращается при числе отказавших объектов **r** или по достижении наработки **T** каждого работоспособного объекта, независимо от того, какое условие выполнено раньше;

(r, T_Σ) – испытание прекращается при числе отказавших объектов **r** или по достижении суммарной наработки всех испытываемых объектов **T_Σ**, независимо от того, какое условие выполнено раньше;

(r₁, n₁), (r₂, n₂), (r_{k-1}, n_{k-1}), r_k – после **r₁** отказов снимают **n₁** работоспособных объектов и т.д. до достижения **r_k** отказов;

(T₁, n₁), (T₂, n₂), (T_{k-1}, n_{k-1}), T_k – после достижения наработки **T₁** снимают **n₁** работоспособных объектов и т.д. до достижения наработки **T_k**;

z – каждый объект испытывают в течение наработки **z_i=min(t_i, τ_i)** при **i=1,2...N**,

где **t_i** – наработка до отказа **i**-го объекта; **τ_i** – наработка до снятия с испытаний работоспособного **i**-го объекта;

S – принятие решения при последовательных контрольных испытаниях (см. разд.7).

Возможно 17 вариантов планов испытаний на надежность:

[N U T], [N U r], [N U N], [N U (r, T)], [N R T], [N R r], [N R (r, T)],

$[N M T], [N M T_{\Sigma}], [N M r], [N M (r, T_{\Sigma\delta})], [N U (r_1, n_1), (r_2, n_2): (r_{k-1}, n_{k-1}), r_k], [N U (T_1, n_1): (T_2, n_2), (T_{k-1}, n_{k-1}), T_k], [N U z], [N U S], [N R S], [N M S].$

Определительные испытания, в зависимости от плана организации их проведения, делятся на следующие условные группы (рис. 6.1):

- $[NUN]$ – это испытания, при которых проверяется некоторое количество изделий N без восстановления, отказавших в процессе контроля до отказа всех изделий, установленных на испытаниях;

- $[NUT]$ – испытания, при которых проверяется N количество изделий на протяжении времени T без замены отказавших за это время;

- $[NUR]$ – испытания, при которых проверяется некоторое количество изделий N без восстановления отказавших до появления R отказов;

- $[NRT], [NRr]$ – испытания, которые проверяются с восстановлением отказавших изделий.

При планировании определительных испытаний определяют объем наблюдений и длительность испытаний. При этом задаются показатели достоверности результатов (доверительная вероятность) и их точность (предельная величина относительной погрешности оценки исследуемого показателя надежности).

Методы планирования разработаны для каждого из планов.

План $[N U N]$. Для определения объема наблюдений (объема выборки N) при оценке средних показателей надежности (средняя наработка до отказа, средний ресурс и т.п.) считаются известными следующие исходные данные:

- относительная ошибка оценки соответствующего показателя надежности δ ;

- односторонняя доверительная вероятность оценки β ;

- предполагаемый коэффициент вариации $V = \sigma\sqrt{X}$;

- вид закона распределения исследуемой случайной величины (наработка до отказа, ресурс, срок службы и т.п.).

Относительная ошибка δ представляет собой меру точности оценки показателя надежности и составляет

$$\delta = \left| \frac{\Pi - \Pi^*}{\Pi} \right|,$$

где Π – оценка показателя надежности; Π^* – односторонняя доверительная граница показателя надежности (наиболее далеко отстоящая от Π).

Относительную ошибку δ выбирают из ряда: 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; одностороннюю доверительную вероятность β – из ряда: 0,8; 0,9; 0,95; 0,99.

Минимальный объем наблюдений N для оценки средних показателей надежности определяется:

а) для экспоненциального закона распределения с плотностью $f(x) = e^{-\lambda t}$ из выражения

$$\frac{2N}{\chi_{1-\beta, 2N}^2} = \delta + 1, \quad (6.1)$$

где $\chi_{1-\beta, 2N}^2$ – квантиль распределения *хи-квадрат* с $2N$ степенями свободы, соответствующий вероятности $(1 - \beta)$.

Это трансцендентное уравнение, допускающее только численные решения, которые табулированы (табл. 6.1 при $V = 1$).

Прогнозируемая продолжительность испытаний t может быть определена из выражения

$$P(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}},$$

где T – ожидаемая средняя наработка до отказа; $P(t)$ или $F(t)$ – минимальная вероятность отказа объекта за время испытаний.

$$t = -T \ln[1 - Q(t)];$$

б) для распределения Вейбулла с плотностью $f(t) = b\lambda t^{b-1} \exp[-\lambda t^b]$ из выражения

$$\frac{2N}{\chi_{1-\beta, 2N}^2} = (\delta + 1)^b \quad (6.2)$$

Решения уравнения (6.2) приведены в табл. 6.1.

в) для нормального распределения с плотностью $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}$

из выражения

$$\frac{t_{\beta, N-1}}{\sqrt{N}} = \frac{\delta}{V}, \quad (6.3)$$

где $t_{\beta, N-1}$ – квантиль распределения Стьюдента с $N-1$ степенями свободы, соответствующая вероятности β .

Таблица 6.1

Объем наблюдений для распределения Вейбулла и экспоненциального распределения (при коэффициенте вариации $V = 1$)

δ	β	N для плана [N U N] при распределении Вейбулла при V , равном									
		0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,5	1,8	2	3
0,05	0,80	50	65	100	200	315	500	650	800	1000	-
	0,90	100	200	250	500	650	1000	-	-	-	-
	0,95	150	250	400	650	1000	-	-	-	-	-
	0,99	315	500	800	1000	-	-	-	-	-	-
0,10	0,80	13	25	32	50	100	150	200	250	315	400
	0,90	32	50	65	125	200	315	400	500	500	1000
	0,95	50	80	100	200	400	650	800	800	800	1000
	0,99	100	150	200	400	650	800	1000	-	-	-
0,15	0,80	6	10	15	25	40	80	80	125	125	200
	0,90	15	25	32	65	80	150	200	250	315	500
	0,95	25	40	50	100	150	200	315	400	500	800
	0,99	40	65	100	200	315	500	800	1000	-	-
0,20	0,80	5	8	10	20	25	40	50	65	80	125
	0,90	10	15	20	40	50	80	125	150	200	315
	0,95	15	25	32	50	100	150	200	250	250	400
	0,99	25	40	65	125	150	250	315	400	500	1000

Решения уравнения (6.3) табулированы, и для определения N можно воспользоваться табл. 6.2.

Таблица 6.2

Объем наблюдений для нормального распределения

δ	β	N для плана [N U N] при нормальном распределении при V , равном				
		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30

0,05	0,80	4	6	13	20	25
	0,90	8	15	25	40	65
	0,95	13	25	40	65	100
	0,99	25	50	100	150	200
0,10	0,80	-	3	5	8	10
	0,90	3	5	8	13	15
	0,95	5	8	13	20	25
	0,99	8	15	25	32	50
0,15	0,80	-	-	3	4	5
	0,90	-	3	4	6	8
	0,95	3	5	6	10	13
	0,99	5	8	13	15	25
0,20	0,80	-	-	-	-	3
	0,90	-	-	4	5	6
	0,95	-	4	5	6	8
	0,99	4	6	8	10	15

Следует отметить, что испытания по плану $[NUN]$ требуют значительного времени (особенно при экспоненциальном законе распределения) и количества изделий.

План $[N U r]$. Число объектов наблюдений N для оценки γ -процентных показателей надежности (или вероятности безотказной работы $P(t)$) определяется из выражения

$$\gamma(r+1)F_{\beta}(m_1, m_2) = (1-\gamma)(N-r), \quad (6.4)$$

где $F_{\beta}(m_1, m_2)$ – квантиль распределения Фишера с m_1 и m_2 степенями свободы, соответствующий вероятности β ; $m_1=2(r+1)$; $m_2=2(N-r)$.

Для нахождения N необходимы следующие исходные данные:

- односторонняя доверительная вероятность β ;
- регламентированная вероятность γ (или предполагаемое значение $P(t)$);
- установленное число отказов (или предельных состояний) r .

Решения уравнения (6.4) табулированы и приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Объем наблюдений для плана $[N U r]$

γ или $P(t)$	β	N для плана $[N U r]$ при оценке γ -процентных показателей надежности при r , равном														
		0	1	2	3	4	5	6	8	10	20	40	50			

0,80	0,80	8	8	13	20	25	32	40	50	65	125	200	-
	0,90	10	10	15	25	32	40	40	50	65	125		-
	0,95	13	13	20	32	40	40	50	65	80	125		-
	0,99	20	20	25	32	40	50	50	65	80	150		-
0,90	0,80	15	15	32	40	50	65	80	100	125	200	-	-
	0,90	20	20	32	50	65	80	80	100	150	200	-	-
	0,95	20	25	40	50	65	80	100	125	150	-	-	-
	0,99	32	32	50	80	80	100	125	125	150	-	-	-
0,95	0,80	32	32	50	80	100	125	150	150	200	-	-	-
	0,90	50	50	65	100	100	125	150	200	-	-	-	-
	0,95	50	65	80	125	150	200	-	-	-	-	-	-
	0,99	65	65	100	150	150	200	-	-	-	-	-	-

Примечание. Прочерк означает, что испытанию подлежит вся партия изделий.

Если по результатам наблюдений за N объектами получено значение вероятности безотказной работы больше заданного, то число отказов (предельных состояний) r пересчитывают по табл. 6.3 для найденного значения $P(t)$ и наблюдения продолжают.

План [N U T]. Число объектов наблюдений N для оценки средних показателей надежности при нормальном распределении может быть определено по табл. 6.4 при следующих исходных данных:

- относительная ошибка δ ;
- односторонняя доверительная вероятность β ;
- предполагаемый коэффициент вариации V ;
- предполагаемая величина $k = T/\bar{t}$ – отношение продолжительности наблюдения к оцениваемому среднему значению исследуемого показателя надежности.

Если по результатам наблюдений за N объектами получено значение k меньше заданного, то число N пересчитывают для найденного значения k и наблюдения продолжают.

Данные табл. 6.4 могут быть также использованы для определения продолжительности наблюдения T при заданном числе объектов наблюдений N . При этом исходными данными являются:

- относительная ошибка δ ;
- односторонняя доверительная вероятность β ;
- предполагаемый коэффициент вариации V ;
- число объектов наблюдения N ;
- предполагаемое среднее значение исследуемого показателя надежности \bar{t} .

Продолжительность наблюдений T вычисляют по формуле $T = k \cdot \bar{t}$, где величину k определяют по табл. 6.4.

Таблица 6.4

Объем наблюдений для плана $[N U T]$ при нормальном распределении

k	V	N для плана $[N U T]$ при нормальном распределении											
		$\delta = 0,05$			$\delta = 0,1$			$\delta = 0,15$			$\delta = 0,2$		
		β			β			β			β		
		0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,99
0,6	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,2	-	-	-	-	-	-	100	-	-	500	800	-
	0,3	1000	-	-	315	500	1000	125	250	500	80	125	500
0,8	0,1	-	-	-	315	500	1000	125	200	400	80	125	250
	0,2	250	400	800	65	100	200	25	40	100	15	25	50
	0,3	250	400	800	65	100	200	32	50	100	15	25	50
0,9	0,1	65	100	200	15	25	50	-	10	20	-	-	13
	0,2	80	125	250	20	32	65	-	15	32	-	-	20
	0,3	150	250	500	40	65	125	15	25	50	-	13	32

Примечание. Прочерк означает, что испытанию подлежит вся партия изделий.

Рассмотрим примеры определения объема и длительности наблюдений при планировании определительных испытаний на надежность.

Пример 1. Для плана $[N U N]$ определить число объектов наблюдений, чтобы с односторонней доверительной вероятностью $\beta = 0,90$ относительная ошибка δ в определении среднего ресурса не превышала $0,10$. Ресурс распределен нормально с коэффициентом вариации $V = 0,2$.

Решение. По табл. 6.1 для $V=0,20$, $\beta=0,90$ и $\delta = 0,10$ находим $N=8$.

По результатам наблюдений за объектами получен коэффициент вариации $V = 0,30$.

Так как $0,30 > 0,20$, необходим дополнительный объем испытаний. Для $V = 0,30$; $\beta=0,90$ и $\delta=0,10$ по табл. 6.1 находим $N=15$. Следовательно, под наблюдение необходимо дополнительно поставить 7 объектов.

Пример 2. Для плана $[N U r]$ определить число объектов наблюдений N , чтобы с односторонней доверительной вероятностью $\beta=0,80$ определить 90 %-ный ресурс объектов γ . Установленное число предельных состояний $r = 5$.

Решение. По табл. 6.3 для $\gamma=0,90$; $\beta=0,80$ и $r=5$ находим $N=65$.

Пример 3. Для плана $[N U T]$ определить продолжительность наблюдений T за 25 объектами, чтобы с односторонней доверительной вероятностью $\beta = 0,95$ относительная ошибка δ в определении средней наработки до отказа не превышала $0,15$. Нарботка до отказа распределена нормально с коэффициентом вариации $V=0,3$; предположительно средняя наработка до отказа $t_{cp} = 400$ ч.

Решение. Для заданных $N=25$; $\beta = 0,95$; $\delta = 0,15$ и $V=0,3$ по табл.6.4 находим $k = 0,9$. Тогда $T=kt_{cp}=0,9 * 400=360$ ч.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Контрольные испытания – испытания, проводимые для контроля качества объекта, по результатам которых устанавливают соответствие между фактическими показателями надежности контролируемого объекта (партии объектов) и нормативными показателями надежности и принимается решение о приемке или браковке.

Методы и планы контроля показателей надежности регламентированы. План контрольных испытаний задан, если установлены:

- 1) количество испытываемых образцов (объем наблюдений);
- 2) стратегия проведения испытаний (с восстановлением и (или) заменой отказавших изделий, без восстановления и (или) замены отказавших изделий);
- 3) правила прекращения испытаний и принятия решения о соответствии или несоответствии изделий заданным требованиям по уровню надежности.

В зависимости от способа получения исходных данных, методы контроля показателей надежности подразделяют на: *расчетные, экспериментальные и расчетно-экспериментальные* (рис. 7.1).

Расчетные методы основаны на вычислении показателей надежности изделия по справочным данным о надежности его составных частей с учетом функциональной структуры изделия и видов разрушения, по данным о надежности изделий-аналогов, по результатам экспериментальной оценки надежности, по данным о свойствах материалов элементов изделий и нагрузок на них, механизме отказа и другой информации, имеющейся к моменту расчета надежности.

Экспериментальные методы основаны на использовании статистических данных, полученных при испытаниях изделий на надежность, или данных опытной или подконтрольной эксплуатации.

Расчетно-экспериментальные методы основаны на вычислении показателей надежности по исходным данным, определяемым экспериментальными методами.

Исходными данными для расчетно-экспериментальных методов контроля служат:

- 1) информация о надежности изделия, полученная в ходе предшествующих испытаний, эксплуатации;
- 2) экспериментальные значения единичных показателей надежности, определяющих контролируемый комплексный показатель надежности;
- 3) экспериментальные значения показателей надежности составных частей изделия, полученные при их автономных (поэлементных) испытаниях, а также в составе другого изделия;
- 4) экспериментальные значения параметров нагрузки, износостойкости и прочности изделия и его составных частей;
- 5) экспериментальные данные об изменении параметров, характеризующих работоспособное состояние изделия.

По методу контроля различают:

- испытания, основанные на *одноступенчатом методе контроля* (решение о соответствии или несоответствии уровня надежности партии изделий принимается по результатам испытаний заранее определенного числа изделий или заданной наработки, т.е. на основании обработки заранее запланированного объема информации);
- испытания, основанные на *последовательном методе контроля* (объем наблюдений, необходимых для принятия решения о соответствии и несоответствии, не может быть заранее установлен и является случайной величиной);
- испытания, основанные на *комбинированном методе контроля*, представляющем собой сочетание одноступенчатого и последовательного методов.

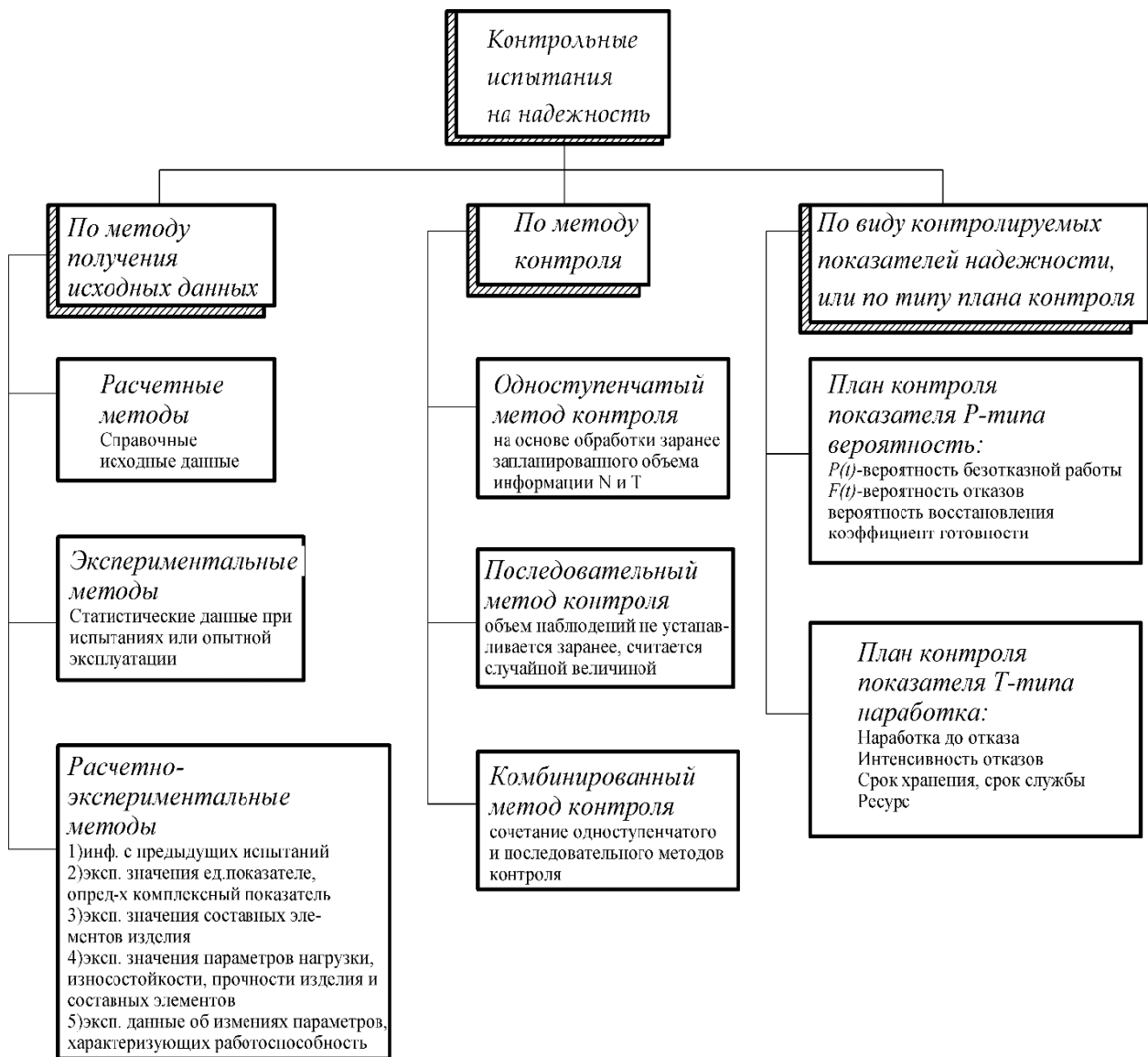


Рис. 7.1. Классификация контрольных испытаний

Одноступенчатым методом целесообразно пользоваться при жестком ограничении времени, отводимого на испытания. Последовательным методом — при ограничении количества объектов испытаний. Особенно эффективно использование последовательного метода при контроле восстанавливаемых объектов.

По виду контролируемого показателя надежности планы контроля разделяются на:

- планы контроля показателя типа P – вероятность (вероятность безотказной работы, вероятность восстановления, коэффициент готовности и т.п.); при контроле показателя типа P знание закона распределения наработки не обязательно;

- планы контроля показателя типа T – наработка (наработка до отказа, ресурс, срок службы, срок хранения и т.п.); при контроле показателя типа T знание закона (включая параметры) распределения контролируемого показателя обязательно.

7.1. Испытания при одноступенчатом методе контроля

В основе построения планов испытаний лежит процедура проверки статистических гипотез при одноступенчатом анализе (рис. 7.2).

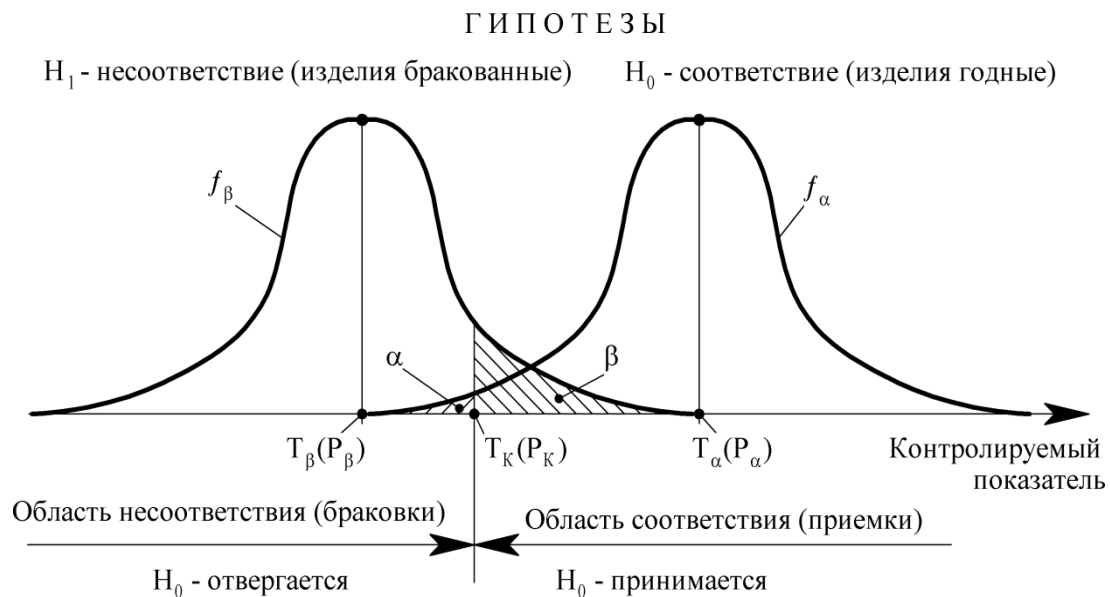


Рис. 7.2. Проверка статистических гипотез при одноступенчатом методе контроля

Исходными данными при выборе планов контроля являются:

α – риск поставщика (вероятность ошибки 1-го рода), т.е. вероятность того, что при испытаниях бракуется партия годных (имеющих приемочный уровень надежности) изделий;

β – риск потребителя (вероятность ошибки 2-го рода), т.е. вероятность того, что при испытаниях будет принята партия негодных (имеющих браковочный уровень надежности) изделий;

$P_\alpha(t)$ или T_α – приемочное значение контролируемого показателя;

$P_\beta(t)$ или T_β – браковочное значение контролируемого показателя;

f_α и f_β – функции плотности распределения контролируемого показателя надежности для изделий, имеющих приемочный (гипотеза H_0 верна) и браковочный (гипотеза H_1 верна) уровни надежности, соответственно.

Значения $P_\beta(t)$ (или T_β) должны соответствовать минимальным значениям показателя надежности, заданным в стандартах или ТУ на изделие. В этом случае величины $\alpha, P_\alpha(t)$ (или T_α) могут быть в одностороннем порядке установлены разработчиком и изготовителем без согласования с заказчиком. Величина разрешающего коэффициента $D = T_\alpha / T_\beta$ может составлять 1,5 ... 5,0.

При планировании контрольных испытаний с использованием одноступенчатого метода контроля определяется объем наблюдений и критическое значение контролируемого показателя T_k (или P_k), определяемое соотношением между α и β и выражаемое предельным числом отрицательных исходов испытания или суммарной наработкой испытуемых изделий.

7.1.1. Планы контроля типа P

Для построения плана контроля необходимо определить количество независимых наблюдений N и приемочное число отрицательных исходов C_α из системы двух уравнений:

$$\sum_{i=0}^{C_\alpha} C_N^i P_\alpha^{N-i} (1-P_\alpha)^i = 1-\alpha; \quad (7.5)$$

$$\sum_{i=0}^{C_\alpha} C_N^i P_\beta^{N-i} (1-P_\beta)^i = \beta. \quad (7.6)$$

Уравнение (7.5) составлено на основе того, что в выборке объема N из партии годных изделий число отрицательных исходов испытаний не превысит C_α с вероятностью $(1 - \alpha)$. Аналогично, уравнение (7.6) есть математическая формулировка условия, заключающегося в том, что в выборке объема N из партии негодных изделий число отрицательных исходов испытаний не превысит C_α с вероятностью β .

Решения системы уравнений (7.5)-(7.6) приведены в табл. 7.1.

Контроль осуществляется следующим образом: организуется N независимых наблюдений, продолжительность которых равна наработке t , для которой задана вероятность, и в каждом наблюдении фиксируют результат: *положительный* или *отрицательный исход*.

Таблица 7.1

Планирование одноступенчатого контроля типа P ($\alpha = \beta = 0,05$)

$P_\alpha(t)$	$P_\beta(t)$	c_α	N	$P_\alpha(t)$	$P_\beta(t)$	c_α	N
0,988	0,996	22	7843	0,950	0,910	31	463
	0,995	12	3886		0,900	22	312

	0,994	8	2402		0,890	17	230
	0,993	6	1688		0,880	14	180
	0,992	5	1312		0,870	11	138
	0,991	4	1015		0,860	10	120
	0,990	4	913		0,850	8	93
	0,980	2	313		0,800	5	50
	0,970	1	157		0,750	4	35
	0,960	1	117		0,650	6	31
					0,600	5	24
0,995	0,990	22	3135		0,550	4	18
	0,980	5	523		0,500	3	13
	0,970	3	256		0,400	2	8
	0,960	2	156		0,300	1	5
	0,950	2	124		-	-	-
	0,940	1	78		-	-	-
	0,930	1	66		-	-	-
0,990	0,980	22	1566	0,880	0,800	38	245
	0,970	8	480		0,750	20	114
	0,960	5	261		0,700	11	57
	0,950	4	182		0,650	8	38
	0,940	3	128		0,600	6	27
	0,930	2	88		0,550	5	20
	0,920	2	77		0,500	4	15
	0,910	2	69		0,400	4	16
	0,900	2	61		0,300	2	6
	0,890	1	42		-	-	-
	0,880	1	38		-	-	-
0,980	0,960	22	783	0,850	0,750	40	203
	0,950	12	386		0,700	21	97
	0,940	8	238		0,650	13	55
	0,930	6	167		0,600	9	36
	0,920	5	129		0,550	7	26
	0,910	4	100		0,500	6	21
	0,900	4	89		0,400	4	13
	0,890	3	69		0,300	3	9
	0,880	3	63				
	0,870	3	58	0,800	0,650	32	118
	0,860	2	43		0,600	20	68
	0,850	2	40		0,550	14	45
	0,800	1	22		0,500	10	30
	0,750	1	17		0,400	6	17
					0,300	4	10

После N -го наблюдения результаты испытаний положительны (гипотеза H_0 принимается), если $r < C_\alpha$ и отрицательны, если $r \geq C_\alpha$ (r – наблюдаемое число отрицательных исходов). Испытания могут быть прекращены раньше (с отрицательным исходом) после того, как r превысит C_α .

Верхняя доверительная граница для показателя типа P при отрицательном исходе испытания с вероятностью $(1 - \alpha)$ не больше приемочного значения P_α . Нижняя доверительная граница для показателя типа P при положительном исходе испытания с вероятностью $(1 - \beta)$ не меньше браковочного значения P_β .

Пример. Для контроля надежности партии невосстанавливаемых изделий заданы два уровня вероятности безотказной работы, соответствующие наработке $t=20$ ч: приемочный уровень $P_\alpha = 0,98$ и браковочный уровень $P_\beta = 0,96$, а также риски $\alpha = \beta = 0,05$. Определить план контроля по одноступенчатому методу.

Решение. По табл. 19.6 для заданных P_α и P_β находим $N=783$ и $c_\alpha = 22$. Это означает, что для контроля нужно поставить на испытания выборку из 783 изделий и испытывать их в течение 20 час. каждое. Испытания прекращают либо после возникновения 23-го отказа с отрицательным исходом, либо по окончании испытаний 783-го изделия с положительным исходом, если к тому времени число отказов было меньше или равно 22.

7.1.2. Планы контроля типа T

Эти планы контроля строятся в зависимости от вида функции распределения соответствующей контролируемой случайной величины (времени или наработки).

При экспоненциальном распределении предельное число отрицательных исходов r_{np} и предельная суммарная наработка определяются из уравнений:

$$\frac{T_\alpha}{T_\beta} = \frac{\chi_{\beta, 2r_{np}}}{\chi_{1-\alpha, 2r_{np}}}; \quad (7.7)$$

$$\frac{t_{\max}}{T_\alpha} = \frac{1}{2} \chi_{1-\alpha, 2r_{np}}^2. \quad (7.8)$$

Рассчитанные по этим выражениям планы контроля приведены в табл. 7.2.

Испытания *прекращаются*, как только будет достигнута одна из этих величин.

При испытаниях *без восстановления или замены отказавших изделий новыми*, объем выборки должен быть не менее предельного числа отрицательных исходов r_{np} , то есть $N \geq r_{np}$.

При испытаниях *с восстановлением или заменой*, объем выборки может быть любым. Допускается уменьшение (увеличение) продолжительности испытаний при пропорциональном увеличении (уменьшении) количества испытываемых изделий.

мых образцов с единственным условием – обеспечить *максимальную суммарную наработку* t_{max} .

Если продолжительность испытаний t_u задана, все образцы работают одновременно, а отказавшие заменяются (или полностью восстанавливаются), то необходимое количество образцов (объем выборки) определяется по формуле

$$N = \frac{t_{max}}{t_u} . \quad (7.9)$$

Если отказавшие изделия не заменяются и не восстанавливаются, количество образцов для достижения той же суммарной наработки при той же общей продолжительности испытаний следует увеличить до

$$N \approx \frac{t_{max}}{t_u} + \frac{t_{max}}{T_\alpha} = \frac{t_{max}}{T_\alpha} \left(\frac{T_\alpha}{t_u} + 1 \right) . \quad (7.10)$$

Таблица 7.2

Планирование одноступенчатого контроля показателя типа T при экспоненциальном распределении

$P_\alpha(t)$	$P_\beta(t)$	c_α	N	$P_\alpha(t)$	$P_\beta(t)$	c_α	N
0,988	0,996	22	7843	0,950	0,910	31	463
	0,995	12	3886		0,900	22	312
	0,994	8	2402		0,890	17	230
	0,993	6	1688		0,880	14	180
	0,992	5	1312		0,870	11	138
	0,991	4	1015		0,860	10	120
	0,990	4	913		0,850	8	93
	0,980	2	313		0,800	5	50
	0,970	1	157		0,750	4	35
	0,960	1	117		0,650	6	31
0,995	0,990	22	3135	0,600	5	24	
	0,980	5	523	0,550	4	18	
	0,970	3	256	0,500	3	13	
	0,960	2	156	0,400	2	8	
	0,950	2	124	0,300	1	5	
	0,940	1	78				
	0,930	1	66				

0,990	0,980	22	1566	0,880	0,800	38	245		
	0,970	8	480		0,750	20	114		
	0,960	5	261		0,700	11	57		
	0,950	4	182		0,650	8	38		
	0,940	3	128		0,600	6	27		
	0,930	2	88		0,550	5	20		
	0,920	2	77		0,500	4	15		
	0,910	2	69		0,400	4	16		
	0,900	2	61		0,300	2	6		
	0,890	1	42						
	0,880	1	38						
	0,980	0,960	22		783	0,850	0,750	40	203
		0,950	12		386		0,700	21	97
0,940		8	238	0,650	13		55		
0,930		6	167	0,600	9		36		
0,920		5	129	0,550	7		26		
0,910		4	100	0,500	6		21		
0,900		4	89	0,400	4		13		
0,890		3	69	0,300	3		9		
0,880		3	63						
0,870		3	58	0,800	0,650		32	118	
0,860		2	43		0,600	20	68		
0,850		2	40		0,550	14	45		
0,800		1	22		0,500	10	30		
0,750		1	17		0,400	6	17		
					0,300	4	10		

В ходе испытаний определяется суммарная наработка t_{Σ} :

- при испытаниях без восстановления или замены

$$t_{\Sigma} = (N-r)t + \sum_{j=1}^r t_j, \quad (7.11)$$

где r – текущее число отказов, соответствующее наработке t каждого работоспособного изделия, отсчитанной от начала испытаний; t_j – наработка j -го из r отказавших изделий, отсчитанная от начала испытаний;

- при испытаниях с восстановлением или заменой

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_i, \quad (7.12)$$

где t_i – суммарная наработка i -го изделия за время испытаний.

Если первым достигается предельное число отрицательных исходов r_{np} (суммарная наработка $t_{\Sigma} < t_{max}$), то результаты испытаний отрицательны; если достигается суммарная наработка $t_{\Sigma} = t_{max}$, а количество отрицательных исходов, соответствующих этой наработке, $r < r_{np}$ – результаты положительны.

Верхняя доверительная граница для показателя типа T у изделий, признанных в соответствие с результатами контроля по плану, выбранному по табл. 7.2, *несоответствующими* заданным требованиям, с доверительной вероятностью $(1-\alpha)\leq T_\alpha$ не больше приемочного значения наработки T_α .

Нижняя доверительная граница для показателя типа T у изделий, признанных по результатам контроля с помощью тех же планов *соответствующими* заданным требованиям, с доверительной вероятностью $(1-\beta)\geq T_\beta$ не меньше браковочного значения наработки T_β .

7.2. Испытания при последовательном методе контроля

В основе построения планов испытаний лежит процедура проверки статистических гипотез при последовательном анализе (рис. 7.3).

Построение планов последовательного контроля и процедура принятия решений при последовательном анализе основаны на вычислении *отношения правдоподобия* (статистики Вальда)

$$L = \frac{P_1}{P_0},$$

где P_1 – вероятность получения выборочных значений при условии, что верна гипотеза H_1 (несоответствие изделий заданным требованиям надежности); P_0 – вероятность получения выборочных значений при условии, что верна гипотеза H_0 (соответствие изделий заданным требованиям надежности).

Порядок принятия решений при последовательном анализе:

1) если $L = \frac{P_1}{P_0} \leq \frac{\beta}{1-\alpha}$ – принять гипотезу H_0 (изделия признаются годными);

2) если $L = \frac{P_1}{P_0} \geq \frac{1-\beta}{\alpha}$ – принять гипотезу H_1 (изделия бракуются);

3) если $\frac{\beta}{1-\alpha} < \frac{P_1}{P_0} < \frac{1-\beta}{\alpha}$ – продолжить испытания (количество полученной при испытаниях информации, недостаточно для вынесения решения о соответствии или несоответствии изделий требованиям надежности по контролируемому показателю).

ГИПОТЕЗЫ

H_1 - несоответствие (изделия бракованные) H_0 - соответствие (изделия годные)

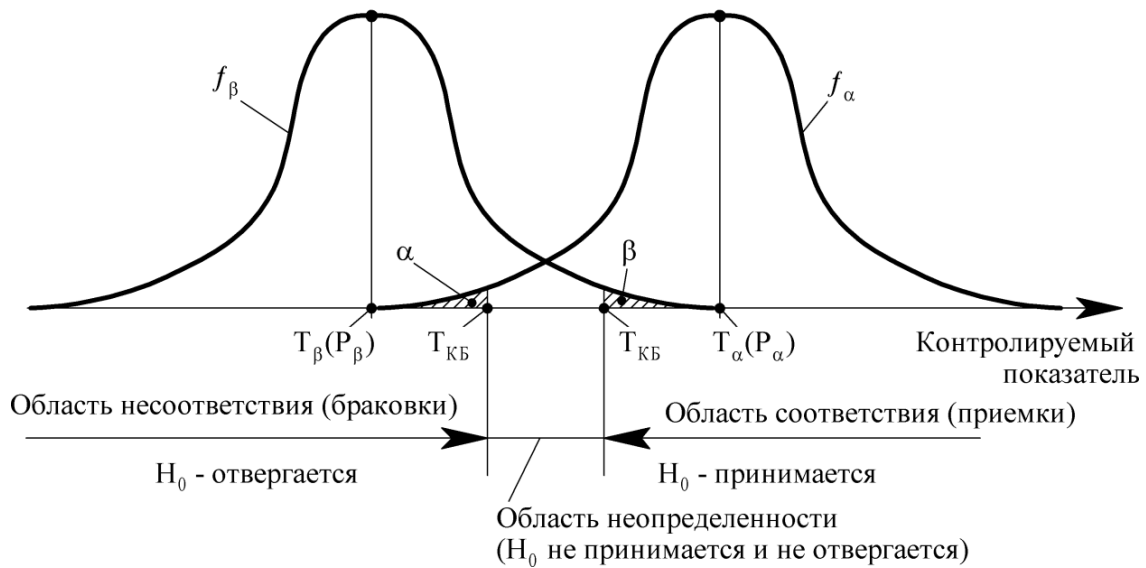


Рис. 7.3. Проверка статистических гипотез при последовательном методе контроля показателей типа «Т»

Рассмотрим построение плана последовательного контроля (рис.7.4) показателя надежности типа T (наработка) для случая, когда наработка до отказа распределена по экспоненциальному закону (один из вариантов планов контрольных испытаний, регламентированных стандартом [12]).

Стандартом [13] предусмотрены также планы контрольных испытаний для нормального и логарифмически нормального распределений наработки, распределения Вейбулла и др.

Для случая экспоненциального распределения наработки до отказа функции плотности распределения описываются формулами:

- для группы изделий, соответствующих установленным требованиям по надежности (верна гипотеза H_0)

$$f_{\alpha}(t) = \frac{1}{T_{\alpha}} e^{-\frac{t}{T_{\alpha}}}; \quad (7.13)$$

- для группы изделий, не соответствующих установленным требованиям по надежности (верна гипотеза H_1)

$$f_{\beta}(t) = \frac{1}{T_{\beta}} e^{-\frac{t}{T_{\beta}}}. \quad (7.14)$$

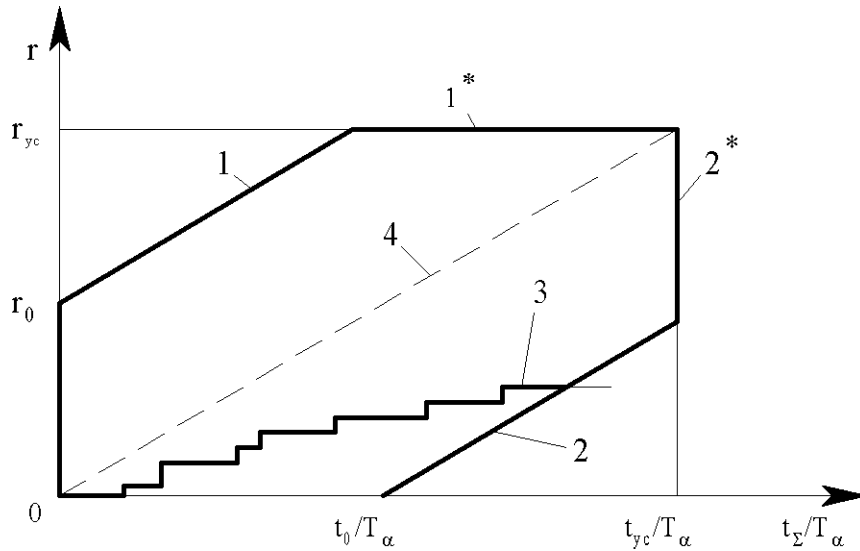


Рис. 7.4. План последовательного контроля показателя типа «Т»: 1, 1* – линия несоответствия (браковки); 2, 2* – линия соответствия (приемки); 3 – график испытания; 4 – линия усечения

Вероятность появления r отказов в течение суммарной наработки t_Σ может быть подсчитана по формуле распределения Пуассона:

$$P_r(t_\Sigma) = \left(\frac{t_\Sigma}{T}\right)^r \frac{e^{-\frac{t_\Sigma}{T}}}{r!}, \quad (7.15)$$

где T – средняя наработка до отказа (на отказ – для восстанавливаемых объектов).

Вероятность получения r отказов при условии, что верна гипотеза H_1 (несоответствие изделий заданным требованиям надежности):

$$P_1 = \left(\frac{t_\Sigma}{T_\beta}\right)^r \frac{e^{-\frac{t_\Sigma}{T_\beta}}}{r!}. \quad (7.16)$$

Вероятность получения r отказов при условии, что верна гипотеза H_0 (соответствие изделий заданным требованиям надежности):

$$P_0 = \left(\frac{t_\Sigma}{T_\alpha}\right)^r \frac{e^{-\frac{t_\Sigma}{T_\alpha}}}{r!}. \quad (7.17)$$

Отношение правдоподобия

$$L = \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_\alpha}{T_\beta}\right)^r e^{-\left(\frac{1}{T_\beta} - \frac{1}{T_\alpha}\right)t_\Sigma}. \quad (7.18)$$

1. Условие приемки $L \leq \frac{\beta}{1-\alpha}$ дает

$$\left(\frac{T_\alpha}{T_\beta}\right)^r e^{-\left(\frac{1}{T_\beta} - \frac{1}{T_\alpha}\right)t_\Sigma} \leq \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (7.19)$$

Логарифмируя (7.19), получаем

$$r \ln\left(\frac{T_\alpha}{T_\beta}\right) - \left(\frac{1}{T_\beta} - \frac{1}{T_\alpha}\right)t_\Sigma \leq \ln \frac{\beta}{1-\alpha},$$

откуда после преобразований получаем условие соответствия:

$$r \leq \frac{\ln \frac{\beta}{1-\alpha}}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}} + \frac{T_\alpha - T_\beta}{T_\beta} \frac{t_\Sigma}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}}. \quad (7.20)$$

Замена знака « \leq » на « $=$ » в неравенстве (7.20) дает уравнение линии соответствия 2 на плане последовательного контроля (рис. 7.4).

2. Условие браковки $L \geq \frac{1-\beta}{\alpha}$ дает

$$\left(\frac{T_\alpha}{T_\beta}\right)^r e^{-\left(\frac{1}{T_\beta} - \frac{1}{T_\alpha}\right)t_\Sigma} \geq \frac{1-\beta}{\alpha}. \quad (7.21)$$

Логарифмируя (7.21), после преобразований получаем условие несоответствия:

$$r \geq \frac{\ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}} + \frac{T_\alpha - T_\beta}{T_\beta} \frac{t_\Sigma}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}}. \quad (7.22)$$

Заменой знака « \geq » на « $=$ » в неравенстве (7.22) можно получить уравнение линии несоответствия 1 на плане последовательного контроля.

Усечение плана осуществляется по одноступенчатому методу. Уравнение линии усечения 4 на плане последовательного контроля:

$$r = \frac{T_\alpha - T_\beta}{T_\beta} \frac{t_\Sigma}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}}. \quad (7.23)$$

Уравнение дополнительной линии соответствия 2' на плане последовательного контроля:

$$\frac{t_{yc}}{T_\alpha} = \frac{(1-\alpha) \ln \frac{1-\alpha}{\beta} - \alpha \ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\frac{T_\alpha}{T_\beta} - 1 - \ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}}. \quad (7.24)$$

Уравнение дополнительной линии несоответствия 1' на плане последовательного контроля:

$$r_{yc} = \frac{T_\alpha - T_\beta}{T_\beta} \frac{t_{yc}}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}}. \quad (7.25)$$

При испытаниях *без восстановления* или замены отказавших изделий минимальный объем выборки $N_{min} = r_{yc}$. При испытаниях *с восстановлением* или заменой объем выборки может быть любым.

При наличии отрицательных исходов, графиком последовательных испытаний является *ступенчатая линия 3*, (см. рис. 7.4) сумма отрезков которой, (параллельных оси t_Σ / T_α) равна отношению суммарной наработки испытываемых образцов в момент времени t испытаний к значению T_α , а сумма отрезков, параллельных оси r , равна числу отрицательных исходов (отказов) к моменту t .

При отсутствии отрицательных исходов графиком последовательных испытаний является *прямая линия с началом в начале координат*, совпадающая с осью t_Σ / T_α . При этом суммарная наработка испытываемых образцов в момент времени t испытаний составит $t_\Sigma = Nt$.

При испытаниях *с восстановлением* или заменой суммарная наработка в момент времени t испытаний составит

$$t_\Sigma = Nt - \sum_{j=1}^r \tau_j,$$

где τ_j – длительность восстановления работоспособности j -го из r отказавших образцов изделия или длительность замены j -го из отказавших образцов.

При испытаниях *без восстановления* или замены суммарная наработка в момент времени t испытаний может быть подсчитана по формуле (7.11).

Результаты испытания положительны, если график испытаний достигает линии соответствия (ступенчатая ломаная линия 3 на рис. 7.4), и отрицательны, если график достигает линии несоответствия. Если конечная точка графика испытаний находится в области неопределенности между линиями соответствия и несоответствия, то испытания должны быть продолжены.

8. ОРГАНИЗАЦИЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Сложность и ответственность задач, решаемых с помощью современной аппаратуры, заставляют предъявлять к ее надежности весьма высокие требования. Наряду с этим наблюдается тенденция к увеличению времени t_p работы аппаратуры с определенным показателем надежности. Как правило, задаваемые вероятности безотказной работы $P(t_p) = 0,97...0,99$ при весьма больших значениях t_p .

Для определения соответствия аппаратуры таким высоким требованиям необходимо проведение продолжительных испытаний над большими объемами выборок. При этом время испытаний может достигать такой продолжительности, что для современной аппаратуры подобные испытания становятся проблемой. При больших значениях заданного времени безотказной работы они не обеспечивают необходимой оперативности контроля надежности изделий, а при больших значениях вероятности безотказной работы не дают достаточной достоверности результатов контроля и испытания [2].

Чтобы правильно оценить реальную надежность разрабатываемой или серийно выпускаемой аппаратуры, ее необходимо экспериментально испытать в условиях воздействия тех факторов, которые наиболее сильно влияют на долговечность и сохраняемость. На проведение экспериментального исследования аппаратуры в реальных условиях требуются длительное время и существенные экономические затраты.

Перечисленные затруднения являются естественной причиной поиска таких методов, которые позволили бы сократить продолжительность испытаний и объем выборки.

Ускоренные испытания имеют цель выявить изменение параметров элементов и узлов аппаратуры при сокращении длительности испытаний и одновременной интенсификации режимов работы и условий эксплуатации аппаратуры.

Величину, показывающую во сколько раз уменьшается значение показателей долговечности или срока сохраняемости при испытаниях относительно

заданных значений показателей долговечности или срока сохраняемости в эксплуатации (при хранении до ввода в эксплуатацию), называют *коэффициентом ускорения испытаний*.

Таким образом, если испытания в нормальном режиме проводят в течение времени t_n , а в форсированном режиме – t_u , тогда интенсивность отказов соответственно равна λ_n и λ_u , а коэффициент ускорения испытаний определяется отношением

$$K_y = \frac{t_n}{t_u} = \frac{\lambda_n}{\lambda_u} \quad (8.1)$$

Способы организации ускорения испытаний на надежность подробно рассмотрены в литературе [1 – 3].

Ускорения испытаний аппаратуры достигают ужесточением воздействия факторов внешней среды. Повышенное воздействие на элементы и узлы аппаратуры приводит к сравнительно быстрому их изнашиванию и старению. При ускоренных испытаниях значения воздействующих на аппаратуру факторов (температура, влажность, электрические и механические нагрузки и др.) должны, как правило, превышать предельные значения, при которых еще сохраняется нормальная работа типовых функциональных узлов и аппаратуры.

Основной научной проблемой теории испытаний, в том числе ускоренных, является разработка и исследование моделей объектов и процессов их старения и изнашивания. В качестве основной модели старения и изнашивания принимают математическую модель в виде однородной или неоднородной «*Марковской цепи*».

Исходя из модели процессов износа, старения и самовосстановления аппаратуры [3] можно выделить три основных метода ускоренных испытаний.

Первый метод ускоренных испытаний, называемый *форсированными испытаниями*, заключается в ужесточении режимов испытаний, эквивалентном такому изменению вектора параметров эксплуатации X , при котором увеличивается скорость протекания процессов износа и в отдельных случаях – самовосстановления. Для увеличения скоростей естественного старения, а также скорости износа используют изменение параметров внешних условий U – температуры, давления, влажности и т.п.

Недостатками этого метода ускорения являются:

– возможность существенного изменения физико-химических процессов старения, изнашивания или самовосстановления;

– практическая невозможность числовой оценки корреляции между значениями параметров испытаний, принадлежащих как \bar{U} , так и \bar{X} , и параметрами скоростей протекания процессов изнашивания, в особенности для вновь освоенных изделий или при изменении технологии производства изделий;

– невозможность количественных оценок основных характеристик надежности испытуемых изделий – ресурса, времени наработки на отказ, масштабных коэффициентов и т.п.

В силу этих особенностей первый метод ускорения можно применять при сравнительных или контрольных испытаниях. Для проведения определительных испытаний этот метод ускорения практически непригоден.

Второй метод ускоренных испытаний предусматривает прекращение испытаний до наступления отказа.

На основе методов индивидуального прогнозирования эволюционных тенденций развития процессов старения и изнашивания [2], определяется момент отказа $\tau_{отк}$. Сущность этого метода заключается в идентификации параметров тренда, характеризующего изменение текущего значения параметра $\gamma(t)$ во времени с последующим прогнозированием, полученного тренда до момента времени $\tau_{отк}$, соответствующего выходу тренда из области допустимых значений $G_{доп}$. В качестве прогнозируемых величин, могут быть использованы, либо параметры качества изделия, либо функции от этих параметров (ГОСТ 15467–79, ГОСТ 16035–81, ГОСТ 22732–77, ГОСТ 22851–77 и ГОСТ 23554.2–81).

Основными *недостатками второго метода* ускоренных испытаний являются:

– априорная неизвестность вида трендов, которая хотя и может быть устранена за счет одновременного использования нескольких видов трендов, однако требует существенного увеличения объемов вычислений;

– трудность нахождения определяющих надежность параметров;

– практическая невозможность установления определяющих параметров допустимых значений объекта, что не позволяет прогнозировать $\tau_{отк}$;

– малые значения коэффициентов ускорения, которые лежат, в основном, в пределах 2...3,5.

Однако, несмотря на упомянутые недостатки, второй метод ускоренных испытаний позволяет установить не только значение $\tau_{отк}$, но и его доверительные интервалы [1, 2].

В силу изложенных особенностей второй метод целесообразно применять для сопредельных испытаний, а также в случае необходимости разделения из-

делий по качественным группам. Кроме того, использование второго метода ускоренных испытаний позволяет создать группу методов ускоренных неразрушающих испытаний.

Третий метод ускоренных испытаний заключается в совместном применении первого и второго методов. Установлены и качественные изменения при совместном применении первых двух методов. Эти изменения позволяют, в основном, избежать недостатков первого метода за счет параллельного проведения испытаний при значениях \bar{U} и \bar{X} , предусмотренных НТД.

Для третьего комбинированного метода ускоренных испытаний характерны следующие *недостатки*:

- невозможность проведения одновременного испытания нескольких изделий;
- сложность вычислительных процедур.

При анализе недостатков каждого метода ускоренных испытаний необходимо учитывать, что широкое применение вычислительной техники, в основном, исключает все недостатки, связанные с большим объемом вычислений. Как правило, для повышения эффективности испытаний и снижения экономических затрат следует, где возможно, увеличивать объемы вычислений, если они приводят к упрощению или сокращению сроков самих испытаний.

При разработке методов ускоренных испытаний на надежность важным является учет еще одного классификационного признака, определяющего отношение проведенных оценок или суждений к генеральной совокупности изделий. В этой связи, можно выделить следующие группы методов: *оценки надежности единичного изделия, группы изделия и генеральной совокупности изделий*.

Приведенная классификация методов ускоренных испытаний может быть дополнена, как за счет введения дополнительных, так и за счет дальнейшей детализации приведенных классификационных признаков.

Методику ускоренных испытаний аппаратуры разрабатывают на основе НТД с учетом специфики функционирования, назначения, условий эксплуатации, конструктивных особенностей аппаратуры.

Проводить ускоренные испытания допускается только в технически обоснованных случаях в соответствии с НТД на изделие.

При организации ускоренных испытаний большое значение имеет выбор воздействующих факторов: *однофакторного* (температура или влажность, или др.); *многофакторного* (температура, биологические факторы, давление, механические воздействия и др.).

При ускоренных испытаниях необходимо, чтобы критерий распределения отказов во времени и по причинам соответствовал критерию и распределению отказов при нормальных испытаниях.

Исследовательские ускоренные испытания на долговечность и сохраняемость проводят путем экспериментального определения параметров в зависимости от срока службы аппаратуры и от значений воздействующих факторов внешней среды.

Во время подготовки к испытаниям разрабатывается программа испытаний (ПИ) в зависимости от категорий и группы изделий [ГОСТ 15150–69 (СТ СЭВ 458–77, СТ СЭВ 460–77), ГОСТ 15151–69, ГОСТ 16350–80, ГОСТ 21322–75, ГОСТ 22261–76, ГОСТ 24682–81, ГОСТ 20.57.406–81].

С момента начала испытаний должны быть зафиксированы наработка аппаратуры, все отказы, повреждения, дефекты и моменты их возникновения, условия, при которых появились отказы (по форме обязательного прил. 3 ГОСТ 17676–81).

Испытательные камеры и стенды должны обеспечивать заданные режимы. Допустимые отклонения на внешние воздействующие факторы: температуры ± 3 °С; относительной влажности ± 3 %; давления ± 5 %; амплитуды вибрации ± 15 %; частоты вибрации ± 2 Гц на частотах до 50 Гц; ± 5 Гц на частотах выше 50 Гц; ускорение(вибрации, удары) ± 20 %.

Испытания проводят циклически, каждый цикл состоит из совместного воздействия основных разрушающих факторов и одновременного или попеременного воздействия дополнительных испытательных факторов, имитирующих эксплуатационные факторы согласно ТУ или ПИ.

Если заранее известно, что отказ объекта вызывают только одновременно воздействующие испытательные факторы, а остальные факторы лишь выявляют их, допускается проводить нециклические испытания.

В НТД на методы испытаний должны быть указаны число образцов, виды и последовательность воздействующих факторов, а также число циклов испытаний, необходимых для определения влияния основных воздействующих факторов.

Граничные значения воздействующих факторов допускается определять с помощью косвенных критериев.

Результаты анализа и обработки данных всех испытаний, контроля и измерений, включая и данные о выявленных отказах и неисправностях, допущенных отступлениях (отклонениях) от требований НТД или ПИ на изделие и их причинах, приводятся в отчетах. В отчетных документах и прилагаемых к ним

материалах отражают необходимые сведения об объекте испытаний, цели и задачи испытаний, место проведения, методику проведения испытаний, схему размещения измерительных преобразователей, сведения о средствах контроля и измерений. Вид отчетных документов с результатами испытаний должен соответствовать требованиям НТД или ПИ на конкретный вид аппаратуры. Если имеются отклонения от требований НТД, то указываются причины отклонения. Объем и содержание материалов, помещаемых в отчетных документах, должны соответствовать целям и задачам испытаний.

Ускоренные испытания осуществляются, в основном, по следующим направлениям:

– минимизация времени испытания изделий при условии, что надежность аппаратуры не ниже требуемого значения; эта задача может быть решена путем оптимизации (стабилизации) режимов и условий испытаний, обеспечивающих достижение требований полноты выявления дефектов;

– определение оптимального значения параметров надежности с использованием информации о характере случайного процесса возникновения отказов из условия получения максимальной эффективности применения данного вида (метода) испытаний.

Постановка задачи, последовательность организации ускоренных испытаний и определение параметров воздействующих факторов иллюстрируются схемой, приведенной на рис. 8.1.

На первом этапе проводится анализ условий эксплуатации аппаратуры (объекта) с определением нормируемых и количественных показателей надежности.

На втором этапе определяется круг функций и задач испытаний, по выполнению которых будет оценено качество функционирования изделия.

На третьем этапе проводятся экспериментальные исследования надежности аппаратуры, определяется значение параметров внешних воздействующих факторов, обеспечивающих предельную степень форсирования испытаний.

На четвертом и пятом этапах на основании статистических данных в зависимости от конструкции аппаратуры окончательно определяются форсирующие факторы и продолжительность испытаний, режим ускоренных испытаний на воздействие влажности и морского тумана.

На шестом этапе обеспечиваются точность, допустимая предельная погрешность испытываемой аппаратуры, средств контроля, измерения и испытаний.

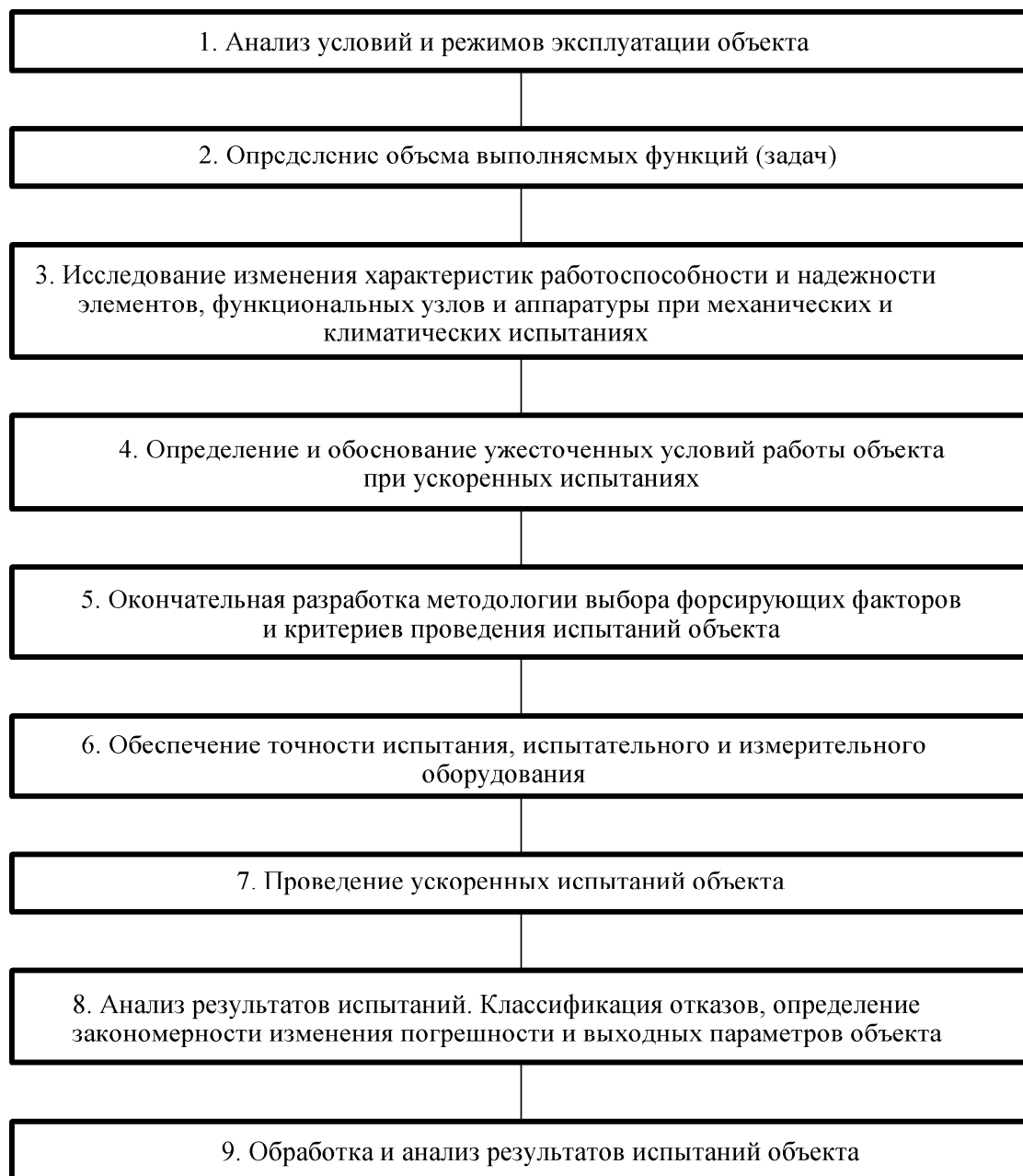


Рис. 8.1. Схема последовательности организации ускоренного испытания объекта на основе информационных потоков

Форсированные испытания вновь разрабатываемой и серийно выпускаемой продукции организуются последующим этапам:

– разработка методики выбора форсирующих факторов и форсирующего режима (на основании статистических данных) для обеспечения максимально возможного ускорения испытаний, при этом физическая природа возникновения отказов должна оставаться неизменной;

– определение интервальных значений коэффициента ускорения при различных внешних воздействующих факторов и нахождение разных законов распределения времени работы изделия до отказа;

- определение динамики распределения и выяснение причины отказов во время нормальных испытаний (принцип наследственности);
- определение зависимости между вероятностями безотказной работы в нормальном и форсированном режимах;
- формирование исходных данных по проведению ускоренных испытаний на надежность.

Для окончательного уточнения исходных параметров форсирующих факторов и времени воздействия этих факторов на изделие с применением ЭВМ, разработки и составления алгоритма поиска необходимо учитывать параметры технологической наработки испытываемого изделия (*до* и *после* испытания).

Проведение технологической наработки позволяет (ГОСТ 23502–79) выявлять и устранять скрытые дефекты, допущенные в процессе проектирования, изготовления и испытания.

Формы учета отказов и дефектов аппаратуры разрабатываются в соответствии с требованиями программы испытаний, ГОСТ 17526–72, ГОСТ 17510–79, ГОСТ 17676–81.

Для уточнения исходных данных и составления алгоритма необходимо рассмотреть принцип "наследственности", позволяющий решать ряд задач теории надежности и ускоренных испытаний. На его основе была разработана теория инвариантности, устанавливающая не изменяющиеся от партии к партии характеристики надежности изделий. Этот принцип в теории надежности называется *принципом инвариантности*. Сущность принципа инвариантности состоит в том, что предполагается существование такого набора конструктивных параметров ω изделия с начальными значениями ω_0 , которые однозначно определяют эволюцию изделия в любом режиме испытаний. Другими словами, если у двух изделий начальные значения ω_0 параметров ω совпадают, то технические параметры, описывающие работоспособность этих изделий, будут изменяться во времени по одному и тому же закону. Отсюда следует, что эти изделия одинаково долго проработают безотказно в режиме ε .

На основании статистических данных, форсирующих факторов, точности и достоверности показателей испытаний составляется структурная схема обобщенного алгоритма определения области (критерия) работоспособности объекта, где оценки точности моделирования $E_{Т.М.}$, зависят от точности полученных результатов.

Специфика проблемы ускоренных испытаний аппаратуры заключается в необходимости одновременного решения двух органически связанных задач:

сокращения продолжительности испытаний и сокращения числа испытываемых образцов.

Сократить продолжительность испытаний можно рационально, используя законы математической статистики и общую теорию планирования эксперимента с применением ЭВМ.

Математическая основа метода должна базироваться на закономерностях процессов разрушения изделия при эксплуатации и испытаниях. Для решения второй задачи необходимо привлечение априорной информации о физическом или статическом характере процессов старения, протекающих в аппаратуре и ее элементах, и привлечение современных математических методов для оптимального использования статистических данных многофакторного эксперимента.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое ускоренные испытания?
2. Для чего нужны ускоренные испытания?
3. В чем особенность первого метода?
4. В чем особенность второго метода?
5. В чем особенность третьего метода?

8.1. Виды ускоренных испытаний

Ускоренными называются испытания, методы и условия проведения которых, обеспечивают получение необходимого объема информации в более короткий срок, чем в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации. Ускоренные испытания бывают сокращенными и форсированными.

Сокращенные испытания – ускоренные испытания без интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения. В сокращенных испытаниях уменьшение сроков получения показателей надежности достигается за счет прогнозирования поведения объекта испытаний на период, больший, чем продолжительность испытаний.

Форсированные испытания – ускоренные испытания, основанные на интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения. При форсированных испытаниях проводится преднамеренное увеличение скорости утраты работоспособности изделия.

Ускоренные испытания разрабатываются с целью сокращения сроков проведения испытания по сравнению с нормальными испытаниями, т.е. испытаниями, методы и условия проведения которых, обеспечивают получение не-

обходимого объема информации в такой же срок, как и в предусмотренных НТД условиях и режимах эксплуатации для данного изделия /23/.

Основной характеристикой ускоренных испытаний является *коэффициент ускорения* – число, показывающее, во сколько раз продолжительность ускоренных испытаний меньше продолжительности испытаний, проведенных в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации (нормальных испытаний). Коэффициент ускорения может исчисляться по наработке и по календарному времени. *Коэффициент ускорения по наработке* – отношение наработки изделия в нормальных испытаниях к наработке в ускоренных испытаниях. *Коэффициент ускорения по календарному времени* – отношение календарного времени нормальных испытаний к календарному времени ускоренных испытаний.

При разработке ускоренных испытаний для конкретного вида изделий необходимо в первую очередь установить принцип ускоренных испытаний, затем на основании сформулированного принципа выбрать метод и режим ускоренных испытаний [22].

Принцип ускоренных испытаний – совокупность теоретических и экспериментально обоснованных закономерностей или допущений, на использовании которых основано проведение испытаний с сокращением их продолжительности.

Метод ускоренных испытаний – совокупность правил применения принципов ускоренных испытаний для получения показателей надежности определенных групп или видов изделий.

Режим ускоренных испытаний – режим, предусмотренный применяемым принципом и методом ускоренных испытаний и обеспечивающий сокращение продолжительности испытаний.

Режим ускоренных испытаний может быть *нормальным* (для сокращенных испытаний), *форсированным* (для форсированных испытаний), *комбинированным* при чередовании нормального и форсированного режимов (при форсированных испытаниях).

Нормальный режим – режим, при котором значения его параметров находятся в пределах, установленных в технической документации для нормальной эксплуатации испытуемого изделия. Частным случаем нормального режима является номинальный режим испытания, соответствующий установленным параметрам внешних воздействий, принимаемых обычно за начало отсчета допустимых отклонений.

Форсированный режим – режим испытаний, обеспечивающий увеличение интенсивности процессов утраты работоспособности по сравнению с нормальным режимом. Форсированный режим может достигаться за счет изменения одного или одновременно нескольких форсирующих факторов.

Форсирующим фактором называется составляющая режима испытаний, изменение параметров которой по сравнению с режимом нормальных испытаний приводит к интенсификации процессов, вызывающих отказ или повреждение. В качестве форсирующего фактора используют усилие (момент), скорость (частоту), температуру, влажность среды, абразивность среды, химическую агрессивность среды и т.д.

Показатели надежности, полученные по результатам ускоренных испытаний, можно пересчитать для нормального режима при условии, что физические процессы разрушения при форсированных и ускоренных испытаниях одинаковы. Поэтому режимы ускоренных испытаний и форсирующий фактор могут изменяться при ускорении процесса испытаний только до определенного предела, называемого предельной нагрузкой. Такой нагрузкой является предельно допустимый уровень форсирующего фактора, обеспечивающий максимально возможную степень форсирования испытаний при сохранении идентичности картины разрушения в условиях ускоренных и нормальных испытаний и выполнении предпосылок, положенных в основу выбранного принципа ускоренных испытаний.

Результаты нормальных и ускоренных испытаний будут сопоставимы, если при соблюдении идентичности природы разрушения, получаемые значения показателей надежности будут одинаковы

$$R(t_H) = R(t_V), \quad (8.2)$$

где $R(t_H)$, $R(t_V)$ – показатели надежности при нормальном и ускоренном режимах соответственно.

При экспоненциальном распределении для вероятности безотказной работы условие (8.2) запишется в виде

$$e^{-\lambda_H t_H} = e^{-\lambda_V t_V}, \quad (8.3)$$

где λ_H , λ_V – интенсивность отказов в нормальном и ускоренном режимах испытаний соответственно.

Если коэффициент ускорения по наработке $k_V = t_H / t_V$, то из (8.3) получаем, что интенсивность отказов в нормальном режиме должна составлять

$$\lambda_H = \lambda_V / k_V. \quad (8.4)$$

Для распределения Вейбулла с плотностью $f(t) = b\lambda t^{b-1} \exp[-\lambda t^b]$ условие равной вероятности безотказной работы при нормальном и ускоренном режимах испытаний (8.2) принимает вид

$$R(t_H) = e^{-\lambda_H t_H^{b_H}} = R(t_V) = e^{-\lambda_V t_V^{b_V}}. \quad (8.5)$$

Из условия (8.5) следует, что параметр масштаба в нормальном режиме должен составлять

$$\lambda_H = \lambda_V \frac{t_V^{b_V}}{t_H^{b_H}} = \lambda_V \frac{t_V^{b_V - b_H}}{k_V^{b_H}}. \quad (8.6)$$

Если ускоренные испытания проводятся с целью определения средней наработки, которая для распределения Вейбулла

$$\bar{t} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) / \lambda^{1/b}, \quad (8.7)$$

то из условия $\bar{t} = k_V \bar{t}_V$ будем иметь

$$\frac{\Gamma\left(\frac{1}{b_H}\right)}{b_H \lambda_H^{1/b_H}} = k \frac{\Gamma\left(\frac{1}{b_V}\right)}{b_V \lambda_V^{1/b_V}} \quad (8.8)$$

(использовано одно из свойств гамма-функции: $\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$).

Отсюда параметр масштаба в нормальном режиме при испытаниях с целью определения средней наработки до отказа (среднего ресурса) в случае распределения Вейбулла должен составлять

$$\lambda_H = \left[\frac{\Gamma(1/b_H)}{\Gamma(1/b_V)} \right]^{b_H} \left(\frac{b_V}{k_V b_H} \right)^{b_H} \lambda_V^{b_H/b_V}. \quad (8.9)$$

8.2. Основные принципы ускоренных испытаний

К основным принципам ускоренных испытаний относятся:

- уплотнение рабочих циклов;
- экстраполяция по времени;
- усечение спектра нагрузок;
- учащение рабочих циклов;
- принцип сравнения;
- экстраполяция по нагрузке;
- принцип "доламывания";
- принцип "запросов".

Уплотнение рабочих циклов применяется при испытании изделий, которые в эксплуатации имеют большие перерывы в работе. На сокращении этих перерывов основано ускорение испытаний. Примером использования принципа уплотнения рабочих циклов могут служить испытания машин с сезонной нагрузкой. В этом случае, сокращая или совсем ликвидируя известные перерывы в эксплуатации, связанные с ночным временем, нерабочими климатическими периодами и т.п., можно добиться значительного коэффициента ускорения по календарному времени.

Экстраполяция по времени основана на гипотезе о возможности достаточно достоверной оценки закономерностей процесса накопления повреждений по начальным этапам процесса. При этом испытания в нормальном режиме проводятся лишь на некотором начальном участке работы изделия, включающем выход в стационарный режим повреждения, измеряется параметр, определяющий накопленное повреждение, а затем эти результаты экстраполируются до перехода в неработоспособное (предельное) состояние. Экстраполяция проводится графически или аналитически.

Практически при всяком детерминированном изменении накопленного повреждения η (например, величины износа) во времени t путем соответствующего преобразования координат стационарный процесс его накопления можно отобразить в линеаризованном виде.

Выравнивание методом наименьших квадратов в этом случае сводится к отысканию коэффициентов a и b уравнения линейной регрессии

$$\eta = at + b . \quad (8.10)$$

Значение этих коэффициентов определяется на основе результатов испытаний по значениям повреждения (величины накопленного износа), соответствующим определенным моментам времени t_i .

При этом искомые коэффициенты уравнения (8.10) могут быть определены по формулам:

$$\begin{aligned} a &= \left(m \sum_i t_i \eta_i - \sum_i t_i \sum_i \eta_i \right) / \left[m \sum_i t_i^2 - \left(\sum_i t_i \right)^2 \right]; \\ b &= \left(\sum_i \eta_i \sum_i t_i^2 - \sum_i t_i \sum_i t_i \eta_i \right) / \left[m \sum_i t_i^2 - \left(\sum_i t_i \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (8.11)$$

где m – число парных значений t_i и η_i .

Для каждого момента времени t_i вычисляется статистическая оценка дисперсии $S_\eta^2(t_i)$ по формуле

$$S_\eta^2(t_i) = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} [\eta_j(t_i) - \bar{\eta}(t_i)]^2. \quad (8.12)$$

где m_i – число экспериментальных точек, полученных в момент времени t_i , (число реализации процесса); j – порядковый номер экспериментальных точек, полученных в момент времени t_i ($1 < j \leq m_i$); $\bar{\eta}(t_i)$ – оценка математического ожидания (среднее арифметическое) процесса $\eta(t)$, определяемая по всем реализациям процесса, наблюдаемым в момент t_i , т.е.

$$\bar{\eta}(t_i) = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \eta_j(t_i).$$

Для стационарного процесса повреждения (изнашивания) результаты испытаний по дисперсии выравниваются квадратичной зависимостью вида

$$S_\eta^2(t) = a + a_1 t + a_2 t^2$$

Если величина $a_2 t^2$ в пределах изучаемого интервала времени оказывается незначительной по сравнению с $a_1 t$, то последним слагаемым можно пренебречь.

Если $a_1 t \ll a_2 t^2$, то считают, что процесс характеризуется доминирующим влиянием начального качества образцов. Экстраполяция для такого процесса может быть осуществлена на основе испытаний как минимум нескольких образцов.

Для эргодического процесса оценка ресурса может быть получена испытаниями даже одного образца, но достаточно большой продолжительности.

Практически можно считать, что экстраполяция по времени дает удовлетворительную оценку долговечности при продолжительности испытаний не менее 40...70 % ресурса изделия. Этот принцип может применяться для изделий, процессы исчерпания ресурса которых достаточно хорошо изучены. Проблема экстраполяции по времени требует решения в каждом конкретном случае трех основных задач:

- 1) выбора уравнения состояния, достаточно надежно описывающего экспериментальные результаты в области изменения параметров испытаний;
- 2) исследования поведения выбранного уравнения вне области эксперимента, что сводится к определению оценки точности прогнозирования;
- 3) выбора объема экспериментальных данных, обеспечивающих надежный прогноз на заданный срок службы.

Так, в результате многочисленных исследований, проведенных в нашей стране и за рубежом, для прогнозирования длительной прочности конструкционного металла на сроки службы более 100 тыс. час. рекомендована температурно-временная зависимость типа

$$T_p = aT^2 \sigma^{-n} \exp(b - c\sigma),$$

где a , n , b , c – параметры-константы, отражающие индивидуальные особенности материала; T – абсолютная температура; σ – напряжение.

Усечение спектра нагрузок заключается в отбрасывании определенной части нагрузок, не оказывающих заметного повреждающего воздействия на объект испытаний. Большинство реальных машин и их элементов подвержены в условиях эксплуатации воздействию определенного спектра случайных или периодически повторяющихся нагрузок. Точное воспроизведение этого спектра

нагрузок представляет значительные технические трудности, поэтому в большинстве случаев проводят статистический анализ повторяемости нагрузок различных уровней в эксплуатационном спектре нагружения объекта и составляют программный блок нагрузок, имитирующий с той же степенью приближения спектр эксплуатационных нагрузок.

При испытаниях изделия многократно воспроизводят программный блок нагрузок, а ресурс, полученный в результате программных испытаний, считают оценкой ресурса изделия в эксплуатационных условиях. Недостаток такого подхода – большая длительность испытаний для изделий высокой надежности.

С целью сокращения длительности программных испытаний в определенных случаях может быть использован *принцип усечения спектра нагрузок*. Частным случаем усечения спектра нагрузок является использование из всего рабочего цикла, состоящего из пуска, установившегося движения и останова, только двух элементов – пуска и останова. Целесообразность применения этого принципа основана на свойствах некоторых механизмов сохранять высокую износостойкость при установившемся движении, которое характеризуется гидродинамическим трением. Во время пуска или останова наблюдается граничное или даже сухое трение, приводящее к значительному износу рабочих поверхностей.

Исходя из предположения, что установившееся движение не приводит к существенному износу, в испытаниях воспроизводят режим пусков и остановов. Ресурс при этом пересчитывают по следующей формуле, пренебрегая временем пусков и остановов

$$T_p = N\bar{t}_z,$$

где N – число пусков-остановов; \bar{t}_z – средняя продолжительность интервала между пусками, определяемая по данным эксплуатации или расчетным методом с учетом функционального назначения испытываемого объекта. Испытания по этому принципу дают несколько завышенную оценку ресурса, но в большинстве случаев вполне приемлемую для практического использования. Форсирование пусками-остановами применяется при ускоренных испытаниях коробок передач, муфт сцепления, электродвигателей и других механизмов и агрегатов, работающих в циклических режимах эксплуатации.

Принцип учащения рабочих циклов используется при стендовых испытаниях изделий и их элементов. Коэффициент ускорения ограничивается скоро-

стными возможностями испытательного оборудования, а иногда и возникновением сопутствующих процессов (например, повышением температуры), искажающих прямой переход к нормальным условиям по частотам.

Принцип учащения рабочих циклов основан на увеличении частоты циклического нагружения или скорости движения под нагрузкой испытуемого элемента изделия. Предполагается, что долговечность изделия, выраженная в количестве циклов до предельного состояния, не зависит от частоты приложения нагрузки. При этом коэффициент ускорения определяется заранее из выражения

$$k_y = f_y / f_H,$$

где f_y, f_H – частота приложения нагрузки соответственно при ускоренных и нормальных испытаниях.

Модификацией принципа учащения рабочих циклов является проведение испытаний подвижных сопряжений деталей машин на изнашивание при повышенных скоростях скольжения V .

Выражая ресурс по износу в виде накопленного пути трения L , и, считая в первом приближении, что $L_y = L_H$ (это условие может быть корректно применено к процессу изнашивания лишь в очень ограниченном диапазоне изменения скоростей скольжения), можно определить коэффициент ускорения

$$k_y = V_y / V_H.$$

Для практической реализации этого принципа необходимо сохранение параметров, определяющих физические условия трения, в тех же пределах, что и при нормальных испытаниях. Так, для поддержания заданного температурного режима необходимо в ускоренных испытаниях использовать охлаждение поверхностей трения. Кроме того, увеличение частоты вращения, например, для подшипников скольжения может замедлить процесс изнашивания благодаря переходу от граничного к гидродинамическому трению.

Вообще, применение принципа учащения рабочих циклов требует экспериментального обоснования режимов ускоренных испытаний во избежание получения несопоставимых результатов.

Принцип сравнения основан на проведении испытаний изделия в форсированном режиме и пересчете полученных результатов с помощью известных данных по эксплуатации аналогичных изделий.

В зависимости от имеющейся информации оценка надежности изделий производится тремя способами:

1) сравнением долговечности двух изделий по результатам только форсированных испытаний;

2) сравнением долговечности изделий, испытываемых в форсированном режиме, с результатами испытаний в этом режиме изделия-аналога и данными его эксплуатации;

3) пересчетом результатов испытаний изделий в форсированном режиме применительно к нормальному режиму по имеющейся зависимости ресурса от уровня нагрузки.

Первый способ применяется в чисто сравнительных испытаниях двух изделий при выявлении более долговечного из них. При этом считается, что изделие, проработавшее больше в форсированном режиме, имеет больший ресурс и в нормальных условиях. Это правомерно при условии, что зависимости ресурса от уровня форсирующего фактора (для сравниваемых изделий) не пересекутся в интервале от номинального до форсированного уровней форсирующего фактора.

Второй способ предполагает наличие информации о долговечности изделия-аналога в форсированном и нормальном режимах. Определяемый из этой информации коэффициент ускорения для аналога умножается на значение наработки до предельного состояния, полученной при испытании нового изделия в форсированном режиме. Такая оценка производится в предположении, что физические свойства, определяющие зависимость ресурса от уровня форсирующего фактора, у нового изделия и изделия-аналога близки. Этот способ наиболее приемлем для испытания новых изделий массового производства, по которым имеется обширная информация о надежности предыдущих модификаций.

Третий способ основан на пересчете результатов форсированных испытаний посредством имеющейся зависимости ресурса изделия от нагрузки.

Принцип "доламывания" является достаточно универсальным принципом ускорения испытаний, который применяется при ресурсных испытаниях элементов машин и конструкций на усталость, изнашивание и длительную прочность.

Для пояснения этого принципа в применении к задачам ускоренной оценки ресурса изделия при некотором эксплуатационном режиме нагружения представим себе, что мы имеем несколько однотипных изделий с различными

наработками при эксплуатационном режиме нагружения. В общем случае эти изделия в результате различной продолжительности эксплуатации получают различную степень повреждения в зависимости от той доли, которую составляет их эксплуатационная наработка от всего ресурса при том же эксплуатационном режиме нагружения. Однако, не зная ресурса изделия при эксплуатационном нагружении, невозможно оценить эту долю в предположении о линейном суммировании повреждений, когда доля вносимого в единицу времени повреждения постоянна и не зависит от начала отсчета по шкале времени.

Принцип "доламывания" предполагает для оценки степени повреждения объекта испытаний за время эксплуатационной наработки подвергнуть объект испытаний воздействию форсированного режима нагружения и на этом режиме довести объект до предельного состояния ("доломать" его).

В результате "доламывания" объекта оценивается его остаточный ресурс на форсированном режиме. Путем сравнения полученного остаточного ресурса объекта с полным ресурсом нового (без предварительной эксплуатационной наработки) объекта того же типа на форсированном режиме нагружения оценивается степень повреждения (степень исчерпания ресурса) объекта за время его эксплуатационной наработки. Если полный ресурс объектов испытаний на форсированном режиме нагружения не известен, необходимо несколько новых объектов из той же партии испытать на этом режиме до предельного состояния, и оценить, таким образом, средний ресурс объектов при форсированной нагрузке, что не займет много времени при правильном выборе коэффициента форсирования нагрузки.

Принцип "запросов" применяется при ускоренных испытаниях изделий машиностроения, отказ которых обуславливается постепенным накоплением износных повреждений, проявляющихся в монотонном изменении уровня контролируемого выходного параметра (износа лимитирующего элемента, производительности, расхода энергии и др.).

Ускоренные ресурсные испытания по принципу запросов предназначены для ориентировочной оценки ресурса испытываемого образца изделия до достижения заданного предельного износа или оценки износа, соответствующего заданной наработке изделия в нормальном режиме. Под износом здесь понимается изменение любого параметра, характеризующего степень постепенной утраты испытываемым изделием ресурса. Износ отсчитывается от начала испытаний.

Принцип "запросов" применим для объектов со стационарным и нестационарным изнашиванием в нормальном режиме. Наиболее эффективно использование данного метода для нестационарного изнашивания, когда интенсивность изнашивания (или скорость размерного износа) зависит от величины накопленного износа. При наличии информации о стационарности изнашивания объекта в эксплуатации целесообразнее использование методов сокращенных испытаний (ускоренных испытаний, не связанных с форсированием режимов).

Испытания по принципу "запросов" проводятся при последовательном ступенчатом чередовании нормального и форсированного режимов в процессе испытаний каждого образца. В процессе испытаний устанавливается зависимость интенсивности изнашивания в нормальном режиме от уровня накопленного изделия износа при условии, что эта зависимость, полученная по результатам ступенчатых испытаний, справедлива для процесса изнашивания в нормальном режиме в интервале от момента окончания приработки до накопления предельного износа. Ускоренное получение всего необходимого ряда уровней накопленного износа обеспечивается испытаниями на ступенях с форсированным режимом (форсированных ступенях).

Достоверность результатов испытаний кроме прочих факторов (погрешности измерений и т.п.) определяется правильностью выбора вида функции изменения интенсивности изнашивания от уровня накопленного изделия износа (или соответствующей функции накопления износа от времени). В процессе обработки результатов испытаний возможна корректировка с целью выбора функции, отличной от предварительно выбранной и приводящей к меньшей по сравнению с ней погрешностью результатов.

При испытаниях по данному методу в качестве нормального режима на соответствующих ступенях применяют любой режим, по отношению к которому оценивается ресурс изделия: постоянный режим, режим с циклическим или стационарным случайным изменением уровня внешних нагрузочных воздействий и др. Параметры нормального режима должны задаваться нормативно-технической документацией, отражающей требования к надежности изделия. При отсутствии таких требований параметры нормального режима назначают в соответствии с требованиями работы изделия в эксплуатации по общим правилам выбора режимов нормальных ресурсных испытаний.

Форсированный режим должен быть выбран таким, чтобы скорость изнашивания на каждой ступени с нормальным режимом (нормальной ступени)

при данном значении износа (или в данном диапазоне износа) не зависела от того, при каком режиме был накоплен этот износ – *форсированном или нормальном*.

К возможным причинам невыполнения этого требования относятся следующие:

а) форсированный режим обладает свойством избирательности по отношению к отдельным элементам изделия, что приводит к изменению относительного распределения износа:

- между отдельными деталями и узлами изделия;
- между поверхностями трения сопряжения;
- и трения одной той же поверхности по отдельным участкам.

б) форсированный режим приводит к значительным изменениям физико-химического состояния поверхностей трения по отношению к условиям работы в нормальном режиме или изменениям, совершенно не свойственным таким условиям, например, пластическому деформированию поверхностных слоев, шаржированию абразивных частиц на поверхности трения, образованию дополнительных вторичных структур и др.

Отсутствие последействия режима в отношении скорости изнашивания на последующей нормальной ступени можно подтвердить непосредственно в процессе испытаний нескольких образцов изделия по настоящему методу. С этой целью испытания двух образцов строятся так, что износ, накопленный в одном из образцов в нормальном режиме после первой форсированной ступени, достигается другим образцом путем испытаний только в нормальном режиме. При этом скорость изнашивания в нормальном режиме после форсированной ступени для одного образца сопоставляется с аналогичной скоростью изнашивания для второго образца.

Испытания каждого испытуемого образца методом запросов начинают с приработочной ступени, проводимой в режиме, установленном для приработки данного изделия. После окончания ступени производят измерение приработочного износа.

9. ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ

При решении важнейшей проблемы наших дней – применения научных методов управления производством большое значение приобретает новая развивающаяся область науки – *математическая теория эксперимента*.

В подготовку и проведение экспериментальных исследований кроме общеизвестных этапов постановки задачи и анализа результатов эксперимента, вводится весьма важный этап – *планирование эксперимента*. Необходимость этого этапа диктуется стремлением получить больше информации при меньших затратах по сравнению с возможностями обычных традиционных методов проведения эксперимента. На этапе планирования эксперимента решаются вопросы определения необходимого числа опытов и выбора матрицы планирования с расположением опытов и порядка их реализации.

Теория планирования эксперимента – это раздел математической статистики, занимающийся вопросами оптимального управления экспериментом при неполном знании механизма изучаемых явлений. Так как испытания являются по существу одним из видов эксперимента, то правомерна попытка использования методов теории планирования эксперимента для решения некоторых задач испытаний. Эти методы основаны на экспериментальном исследовании случайных связей между некоторыми показателями качества системы и совокупностью различных факторов, характеризующих те или иные внешние или внутренние условия ее функционирования [2, 3].

В настоящее время в математической теории планирования экспериментов выделяют два основных направления:

- планирование экстремальных экспериментов;
- планирование экспериментов по выяснению механизма явлений [2, 3].

Применительно к испытаниям планирование первого вида целесообразно применять в следующих случаях:

- при выборе параметров аппаратуры и условий ее эксплуатации, обеспечивающих получение оптимальных в определенном смысле показателей качества функционирования аппаратуры (контрольные, сравнительные, оценочные и другие испытания);
- при необходимости оценить предельные (экстремальные) возможности изделия при действии на него комплекса возмущений для определения технического ресурса изделия (ресурсные испытания);
- при необходимости выяснить 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. функцию, описывающую связь между входными характеристиками и контролируемыми выходными характеристиками. При определенных условиях

данный вид планирования может быть использован для оценки степени влияния тех или иных факторов на показатели, характеризующие эффективность процесса испытаний.

Основной целью испытаний является экспериментальная оценка поведения испытуемого объекта или отдельного его элемента в реальных условиях эксплуатации для принятия решения об их функциональной пригодности, а также контроль соответствия значений показателей объекта требованиям, установленным в стандартах на изделия конкретных видов.

Планирование первого вида позволяет определить такую последовательность проведения испытательных операций, которая обеспечивает достижение этой цели с минимальными затратами. Планирование второго вида необходимо для того, чтобы изучить механизм протекания процесса в испытуемой аппаратуре при воздействии на нее различных возмущающих факторов и тем самым определить состав испытательных воздействий (многофакторные испытания), наиболее полно отражающих реальные условия эксплуатации.

На практике не всегда можно представить математическую модель, устанавливающую с необходимой точностью связи между величиной Y_i , характеризующей эксплуатационно-технические свойства испытуемого объекта, и независимыми переменными X_i , которые имитируют различные возмущающие, дестабилизирующие воздействия при испытаниях. Переменные или факторы (при многофакторных воздействиях) образуют N -мерное пространство.

В матрице планирования для полного факторного эксперимента типа 2^k все уровни каждого фактора сочетаются со всеми уровнями остальных факторов и число всех этих сочетаний равно $N = 2^k$, где k – число опытов.

Применение теории планирования эксперимента требует выполнения определенных экспериментальных исследований для определения коэффициентов уровня регрессии b_{ij} .

Уравнение устанавливает связь между воздействующими факторами и контролируемой величиной (иногда его называют функцией отклика [2]). Эту задачу можно решать однофакторным методом, варьируя каждую переменную $(x_1; x_2; \dots; x_N)$ по очереди. Если для каждого фактора сделать k повторных опытов и если факторы варьируются только на двух уровнях, которым приписывается кодовое обозначение $(+1)$ – верхний уровень фактора, (-1) – нижний уровень фактора), тогда можно найти соотношение для определения выборочных оценок b_{ij}^* и их дисперсий $\sigma^2[b_{ij}^*]$ [2].

Допустим, что изучается влияние трех независимых переменных (факторов) x_1, x_2 и x_3 , например, температуры, влажности и напряжения. Три интересные нас коэффициента регрессии можно оценить в процессе проведения однофакторного эксперимента Легко видеть по матрице планирования, что все возможные комбинации для трех факторов, варьируемых на трех уровнях, будут исчерпаны, если будут поставлены восемь опытов (2^3).

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего нужно оптимальное планирование испытаний?
2. Что является основной целью испытаний?
3. В чем заключается планирование первого рода?
4. Сколько опытов необходимо провести при трех воздействующих факторах?

10. ИСПЫТАНИЕ НА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ

Теплоустойчивостью называют свойство объекта сохранять работоспособность в условиях повышенной температуры окружающей среды. Нагрев объекта и средств измерений может происходить под воздействием внешних и внутренних факторов, причем это воздействие бывает непрерывным (стационарным), периодическим и аperiodическим.

Непрерывному тепловому воздействию подвергается изделие, работающее в стационарных условиях (в помещении), периодическому – изделия подвижного типа (переносимая, полевая и другая специальная), аperiodическому – воздушная техника (самолетная, ракетно-космическая).

Действие внутренних факторов главным образом зависят от принципиальной схемы, компоновки элементов и конструкции объекта.

Испытание на теплоустойчивость проводят в целях проверки способности изделий выдерживать изменения температуры внешней среды и сохранять свои параметры после этого воздействия при эксплуатации, транспортировании и хранении.

Существуют два основных способа испытаний на воздействия температуры:

- 1) изделие помещают в камеру, где с помощью программного устройства или вручную изменяется температура;
- 2) изделие переносят из одной камеры в другую, где заранее установлены заданные температуры среды.

При первом способе испытаний, когда температура в камере изменяется по закону $Q_k = K \cdot t$, температура изделия

$$\theta_x = K \cdot (t - \tau_\theta),$$

где K – коэффициент пропорциональности; τ_θ – постоянная времени нагрева (охлаждения), определяемая по формуле

$$\tau_\theta = \frac{\sum_{j=1}^m C_j \cdot V_j}{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot S_i},$$

где C_j – теплоемкость отдельных частей изделия; V_j – объемы отдельных частей изделия; μ_i – коэффициенты теплоотдачи отдельных участков поверхности изделия; S_i – площади отдельных участков поверхности изделия.

При изменении температуры в камере по синусоидальному закону

$$\theta_k = \theta_{k,\max} \cdot \sin(\omega t)$$

температура изделия будет изменяться в соответствии с выражением

$$\theta_x = \frac{\theta_{k,\max}}{\sqrt{1 + (\omega \tau_\theta)^2}} \sin(\omega t - \varphi)$$

где $\omega \tau_\theta = \operatorname{tg} \varphi$; $\omega = 2\pi f_\theta$; f_θ – частота изменения температуры.

Таким образом, амплитуда изменения температуры изделия θ_x будет меньше, чем амплитуда изменения температуры камеры θ_k , и, кроме того, изменения температуры будут сдвинуты на $\Delta t = \frac{\varphi}{\omega}$. Это очень существенное обстоятельство необходимо учитывать при испытании изделий, имеющих различное конструктивное оформление, разные рабочие объемы и поверхности охлаждения, особенно при испытании изделий в упаковке.

Если изделие переносят из камеры с температурой θ_1 в камеру с температурой θ_2 , изделие испытывает тепловой удар, соответствующий уравнению

$$\theta_x - \theta_1 = (\theta_2 - \theta_1) \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_\theta}\right) \right].$$

Через время $t = \tau_\theta$, температура изделия $\theta_x = \theta_1$.

В процессе нагрева или охлаждения возникают перепады температуры $\Delta\theta_{\max} = \theta_2 - \theta_1$, вызывающие, в свою очередь, появление в материале изделия внутренних температурных напряжений и тепловых смещений вместе соединения. Частично эти явления при достижении установившейся температуры $\theta = \theta_2$ пропадают.

Существует три вида испытаний на теплоустойчивость.

Испытание на теплоустойчивость при эксплуатации проводят с целью проверки параметров и сохранности внешнего вида изделий в условиях воздействия повышенной температуры и после него при эксплуатации.

Испытания изделий проводят одним из следующих методов:

- в камере без электрической нагрузки;
- в камере под электрической нагрузкой;
- вне камеры под электрической нагрузкой.

Испытания на теплоустойчивость проводят в камере тепла, которая обеспечивает испытательный режим согласно программе испытаний(ПИ) с допустимыми отклонениями, указанными выше.

Испытания объекта и средств измерений проводят с учетом требований ГОСТ 20.57.406–81. Изделия выдерживают в нормальных климатических условиях (температура воздуха 15...35 °С при относительной влажности 45...80 % и атмосферном давлении 84...106 кПа) в течение времени, установленного в стандартах, ТУ и программе испытаний на изделия. Затем изделия помещают в камеру, в которой устанавливается повышенная рабочая температура в зависимости от группы (ГОСТ 16019–78, ГОСТ 22261–76), степени жесткости (ГОСТ 16962–71, ГОСТ 20.57.406–81), климатического и химического исполнения (ГОСТ 15150–69, ГОСТ 24682–81) и условий применения (ГОСТ 12997–76).

На заключительном этапе испытаний объект выключается, а температура в камере повышается до предельного значения. Затем камера открывается, и температура понижается до нормальной. После выдержки аппаратуры в нормальных условиях вновь проводят измерение необходимых параметров и внешний осмотр.

Испытание на теплоустойчивость при транспортировании и хранении проводят в целях проверки способности изделий выдерживать воздействие верхнего (предельного) значения температуры окружающего воздуха, если температура при транспортировании и хранении выше температуры при эксплуатации.

Изделия помещают в камеру тепла, после чего температуру в камере устанавливают равной верхнему значению температуры окружающего воздуха при транспортировании и хранении. Допускается помещать изделия в камеру, температура в которой установлена заранее. При этом влажность не нормируется. Изделия выдерживают при заданной температуре в течение времени, достаточного для прогрева аппаратуры по всему объему (устанавливается ТУ или ПИ). После этого изделия извлекают из камеры и выдерживают в нормальных климатических условиях в течение времени, указанного в ТУ или ПИ, и затем проводят их внешний осмотр и проверку.

Испытание на теплоустойчивость при транспортировании и хранении допускается совмещать с испытанием на теплоустойчивость при эксплуатации по ГОСТ 15151–69. В этом случае, после испытания на теплоустойчивость, при эксплуатации изделия не извлекают из камеры, а температуру в камере повышают до верхнего значения температуры окружающего воздуха при транспортировании и хранении.

Испытания под электрической нагрузкой вне камеры проводят в тех случаях, когда установлена предельно допустимая температура контролируемого участка (блока, узла, ячейки) тепловыделяющих изделий. Их испытывают вне камеры в рабочих (эквивалентных) схемах, установив предельно допустимую температуру (или ее превышение) для контролируемого участка регулировкой принудительного охлаждения.

При решении проведения испытания необходимо учитывать наличие в изделиях критических к температуре участков, которые при указанном методе могут приобретать температуру более низкую, чем во время испытаний на теплоустойчивость при эксплуатации, транспортировании.

Испытания на воздействие изменения температуры среды проводят в целях определения способности изделия и средств измерений сохранять свой внешний вид и параметры после воздействия изменения температуры среды в пределах значений, установленных в стандартах ТУ на изделия и ПИ.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации изделий, а также их конструктивных особенностей, для испытаний согласно ГОСТ 16962–71, ГОСТ 20.57.406–81 используют один из следующих методов:

- метод двух камер (для испытания изделий, которые в условиях эксплуатации подвергаются быстрому изменению температуры);
- метод одной камеры (для испытания изделий, работающих в условиях постепенного изменения температуры);
- метод двух жидкостных ванн (для условий эксплуатации с резким изменением температуры);
- комбинированный метод.

При проведении испытаний следует руководствоваться следующими положениями:

- для изделий, которые подвергаются воздействию верхнего или нижнего значения температуры один раз за время эксплуатации, диапазон температур, в котором проводят испытание на изменение температур, должен быть не меньше диапазона температур, установленного в стандартах и ПИ для транспортирования и хранения;

- параметры циклов проведения испытания на воздействие изменения температуры среды устанавливаются в стандартах, ТУ на изделия, ПИ;

- если испытания на теплоустойчивость или холодоустойчивость совмещают с испытанием на воздействие изменения температур, то температуры должны устанавливаться равными соответственно верхнему или нижнему значению температуры при эксплуатации, транспортировании и хранении;

- по окончании испытания аппаратуру выдерживают в нормальных климатических условиях в течение времени, установленного ТУ или ПИ, после чего проводят внешний осмотр и проверку параметров аппаратуры.

Испытание *методом быстрого изменения температуры* проводят в камерах тепла и холода в соответствии с графиком, показанным на рис. 10.1, а. Изделие подвергается воздействию трех непрерывных следующих один за другим циклов (A – начало цикла; t_1 – время выдержки; t_2 – время переноса).

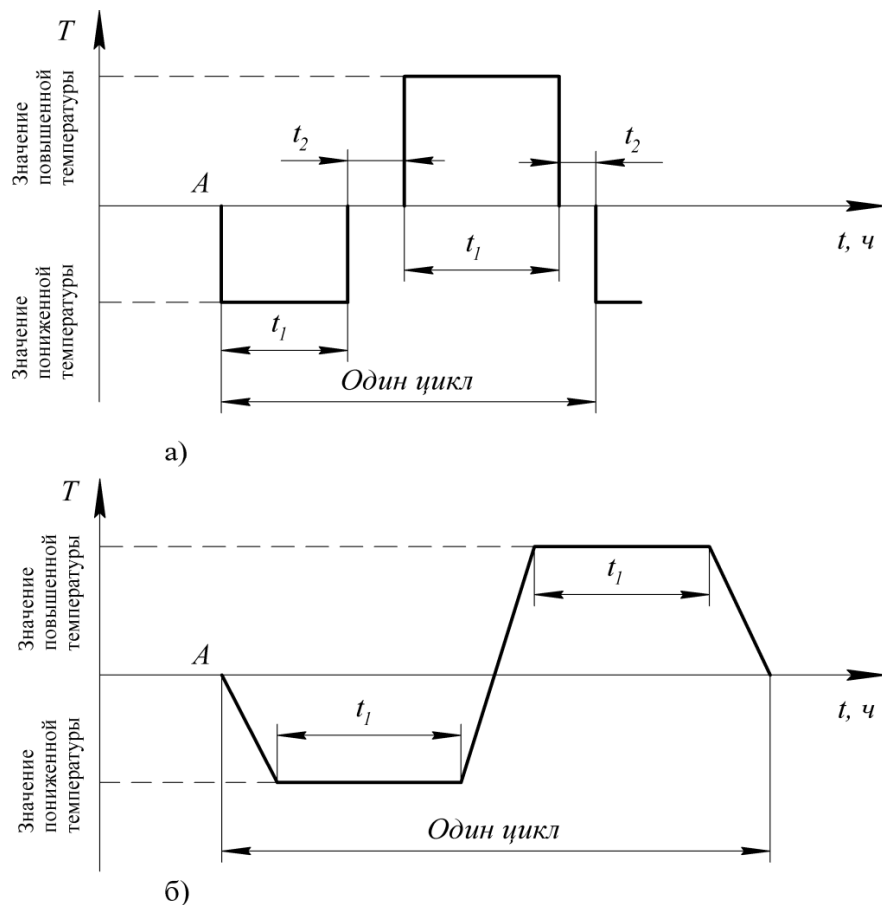


Рис. 10.1. Графики изменения температуры одного цикла: а – с переносом испытуемого изделия из одной камеры в другую; б – испытание изделия в одной камере

Испытание *методом постепенного изменения температуры* проводят в термокамере, где изменение температуры соответствует графику, указанному на рис. 10.1, б. Изделие подвергается воздействию двух непрерывных следующих один за другим циклов.

Испытание *методом резкого изменения температуры* проводят в двух ваннах с водой, в одной из которых вода имеет пониженную, другой – повышенную температуру, соответствующие испытательным режимам. Изделие подвергают воздействию десяти циклов, аналогичных циклу, график которого приведен на рис. 10.1, а.

Испытание *комбинированным методом* проводят в камерах влажности, тепла и холода в следующем порядке:

- на воздействие повышенной влажности;
- на холодоустойчивость при температуре эксплуатации;
- на теплоустойчивость в камере под электрической нагрузкой;
- на воздействие повышенной влажности.

Изделия считают выдержавшими испытание, если они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах или ТУ на аппаратуру.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под теплоустойчивостью?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на теплоустойчивость?
3. Какова процедура проведения испытаний на теплоустойчивость?
4. Как проводятся испытания на воздействие двухкамерным методом?

11. ИСПЫТАНИЕ НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ

Холодоустойчивостью называют свойство изделия сохранять работоспособность при нижнем значении температуры окружающего воздуха или после пребывания в этих условиях.

Холодопрочностью называют способность изделия сохранять работоспособность после пребывания в предельных климатических условиях транспортирования и хранения.

Существует два метода испытаний на холодоустойчивость:

- 1) испытание при температуре эксплуатации;
- 2) испытание при температуре транспортирования и хранения.

Испытание на холодоустойчивость при эксплуатации проводят в целях проверки параметров изделия в условиях воздействия внешней среды при нижнем значении температуры (или) после пребывания ее; в этих условиях.

Испытание объекта и средств измерений на холодоустойчивость и холодопрочность проводят в камерах холода следующим образом:

– в нормальных условиях применения объект включают и по истечении времени установления рабочего режима измеряют параметры, предписанные стандартами или ТУ на изделие конкретного вида;

– объект помещают в камеру холода;

– температуру в камере понижают до нижнего значения температуры рабочих условий и поддерживают ее с погрешностью не более $+3$ °С в течение 2...4 ч в зависимости от массы изделия (см. ГОСТ 22261–76).

После этого проверяют требуемые параметры.

Испытание на холодоустойчивость при температуре транспортирования и хранения. Испытание проводят в целях проверки особенности изделий выдерживать воздействие нижнего значения температуры окружающего воздуха при транспортировании и хранении по ОСТ 15150–69. Испытание проводят, если нижнее значение температуры при транспортировании и хранении ниже, чем нижнее значение температуры при эксплуатации.

Изделие помещают в камеру холода (тепла), после чего температуру в камере устанавливают равной нижнему значению температуры при транспортировании и хранении. Допускается помещать изделия в камеру, температура в которой установлена заранее.

Испытание на холодоустойчивость при транспортировании и хранении допускается совмещать с испытанием на холодоустойчивость при эксплуатации. В этом случае после одного испытания изделие не извлекают из камеры, а температуру понижают до значения, указанного в табл. 7, ОСТ 1Б150–69.

Изделия считают выдержавшими испытание, если после испытания они удовлетворяют требованиям, установленным в НТД или ПИ для данного вида изделия.

В технически обоснованных случаях допускается увеличение времени испытания, устанавливаемое в НТД на изделия конкретных групп и видов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под холодоустойчивостью?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на холодоустойчивость?
3. Какова процедура проведения испытаний на холодоустойчивость?

12. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНЕЯ И РОСЫ

Испытание этого вида проводят в целях проверки способности изделий выдерживать номинальное электрическое напряжение при конденсации на них инея и росы.

Испытания на воздействие атмосферных конденсированных осадков в лабораторных условиях проводят в камерах холода, влажности и термобарокамерах. Перед началом и после испытания изделия при нормальных климатических условиях, если иные условия с более жесткими допусками не оговорены в НТД или ПИ, и измеряют параметры, указанные в стандартах и ТУ на изделия и ПИ, в том числе проводят проверку полным испытательным напряжением.

Порядок испытания следующий:

- изделия помещают в камеру холода и выдерживают при температуре -20 ± 5 °С в течение 2 ч;
- изделия извлекают из камеры, помещают в нормальные условия, после чего на изделия подают электрическое напряжение, причем вид напряжения, его значение, время выдержки и место приложения устанавливаются в НТД или ПИ.

Изделие считают выдержавшим испытание, если при подаче напряжения не произошло пробоя или поверхностного перекрытия.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие инея и росы?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие инея?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие инея и росы?

13. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

Влагоустойчивостью называют способность аппаратуры сохранять работоспособность в условиях повышенной относительной влажности. Испытания на влагоустойчивость проводят для определения устойчивости параметров аппаратуры при относительно кратковременном (до 96 ч) или длительном (до 56 суток) ее пребывании; в атмосфере с повышенной относительной влажностью.

Существует три метода испытаний на влагоустойчивость: *циклический* (16 + 8 ч); *постоянный* (без конденсации влаги) и *циклический* (12 + 12 ч).

Применение конкретного метода испытаний устанавливают в зависимости от особенностей конструкции, назначения, нормы для исполнения, степени жесткости, группы и категорий аппаратуры по ГОСТ 15150–69, (СТ СЭВ 458–77, СТ СЭВ 460–77), ГОСТ 16962–71, ГОСТ 16019–78, ГОСТ 17676–81, ГОСТ 20.57.406–81.

Испытания с конденсацией влаги являются циклическими с непрерывным следованием циклов. Каждый цикл состоит из двух частей. В первой части цикла испытаний изделия подвергают действию влажности при верхнем значении температуры, относительной влажности $93 \pm 3 \%$ в течение 16 ч. Во второй части цикла испытаний камеру с изделиями охлаждают до температуры не менее чем на 5 °С ниже номинальной.

Повышение относительной влажности и температуры для проведения каждого последующего цикла должно быть достаточно быстрым, чтобы обеспечить конденсацию влаги на изделиях.

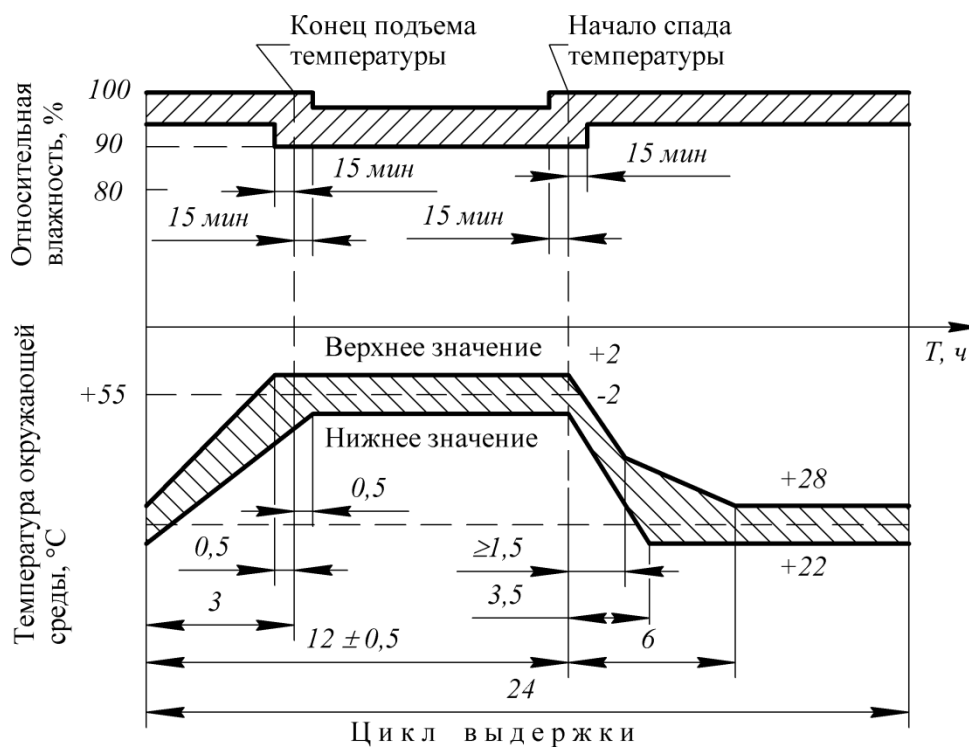


Рис. 13.1. Этапы каждого цикла при испытании на влагоустойчивость

Каждый цикл состоит из следующих этапов (рис. 13.1) [ГОСТ 20.57.406–81]:

- температуру в камере повышают до $55 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $3 \pm 0,5 \text{ ч}$. Относительная влажность в этот период должна быть не менее 95 %, за исключением последних 15 мин, в течение которых она должна быть не менее 90 %. На изделиях в этот период должна конденсироваться влага;

- в камере поддерживают температуру $55 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ до тех пор, пока не истечет $12 \pm 0,5 \text{ ч}$ от начала цикла. Относительная влажность в этот период должна быть $93 \pm 3 \text{ } \%$, за исключением первых и последних 15 мин, в течение которых она должна быть в пределах 90...100 %. В течение последних 15 мин на изделиях не должно быть конденсации влаги;

- температуру в камере понижают до $25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3...6 ч. В этот период относительная влажность должна быть не менее 95 %, за исключением первых 15 мин, в течение которых она должна быть не менее 90 %. Скорость снижения температуры в течение первых 1,5 ч должна быть такова, чтобы за $3 \text{ ч} \pm 30 \text{ мин}$ температура могла снизиться до $25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$;

- в камере поддерживают температуру $25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительную влажность не менее 95 % до конца цикла.

Испытание без конденсации влаги проводят следующим образом. Изделия помещают в камеру влажности и выдерживают при номинальной температуре, соответственно для длительного или ускоренного испытания, в течение времени, указанного в стандартах и ПИ, но не менее 1 ч. Относительную влажность воздуха повышают до $97 \pm 3 \%$, после чего температуру и влажность в камере поддерживают постоянными в течение всего времени испытания.

Допускается предварительно нагревать изделия до температуры, превышающей испытательную на $2...3 \text{ }^\circ\text{C}$, и вносить их в камеру с заранее установленным испытательным режимом.

Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха (кратковременное) проводят для выявления грубых технологических дефектов в серийном производстве, если специфика производства и конструктивные особенности изделий таковы, что дефекты могут быть выявлены этим испытанием, а также дефектов, которые могут возникнуть в изделиях при других видах испытаний.

Существует два метода испытаний (ГОСТ 20.57.406–81):

- циклический с конденсацией влаги;
- постоянный без конденсации влаги.

Конкретный метод испытания и режим проведения установлены в стандартах, ТУ и ПИ.

Изделия, у которых при увлажнении под напряжением может проявляться разрушающее действие электролиза при электрохимической коррозии, рекомендуется испытывать в непрерывном режиме с приложением электрического напряжения. Вид напряжения, его значение и способ приложения установлены в стандартах и ПИ.

Изделия, у которых при увлажнении под напряжением может проявляться разрушающее действие электролиза при электрохимической коррозии, рекомендуется испытывать в непрерывном режиме с приложением электрического напряжения, вид напряжения, его значение и способ приложения установлены в стандартах и ПИ.

После испытания проводят проверку параметров.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие повышенной влажности воздуха?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие повышенной влажности воздуха?

3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие повышенной влажности воздуха?

14. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Испытания на воздействие пониженного и повышенного атмосферного давления проводят в целях проверки способности и устойчивости параметров и сохранности внешнего вида изделия в условиях пониженного и повышенного атмосферного давления.

Испытание на воздействие пониженного атмосферного давления проводят одним из следующих методов:

- 1) при нормальной температуре;
- 2) при повышенной рабочей температуре для изделий, предназначенных для работы при давлении $6,7$ кПа и выше;
- 3) при повышенной рабочей температуре для изделий, предназначенных для работы при давлении ниже $6,7$ кПа.

Первый метод применяют для испытания нетепловыделяющих изделий, а также для испытания тепловыделяющих изделий, для которых нагрев при электрической нагрузке, нормированной для пониженного атмосферного давления, не является критичным.

Второй и третий методы применяют для испытания тепловыделяющих изделий, для которых нагрев при электрической нагрузке, нормированной для пониженного атмосферного давления, является критичным.

Для обеспечения воспроизводимости результатов испытаний тепловыделяющих изделий на воздействие пониженного атмосферного давления необходимо правильно выбрать соотношения площади поверхности, окружающей изделия, и общей площади поверхности: изделия по ГОСТ 20.57.406–81.

Испытание проводят в барокамере, которая должна обеспечивать испытательный режим с отклонениями, не превышающими указанные в стандарте, ТУ или ПИ.

Способ установки и положение изделий при испытаниях, а также минимально допустимые расстояния между изделиями в барокамере устанавливают в стандартах, ТУ на изделия и ПИ. Определение минимально допустимых расстояний между тепловыделяющими изделиями в барокамере проводят в соответствии с ГОСТ 20.57.406–81.

Приближенный расчет минимально допустимых расстояний между тепловыделяющими испытуемыми изделиями проведем для параллельно расположенных изделий, имеющих вид параллелепипеда.

Дано: предельно допустимая по стандартам или ПИ температура изделия T_1 , °С; температура поверхности, окружающей изделия T_2 °С; максимально допустимое положительное отклонение температуры изделия, возникающее вследствие взаимного теплового влияния изделий ΔT_1 , °С; наибольшие линейные размеры a , b взаимооблучаемых поверхностей изделия (без выводов), мм.

Предельную температуру нагрева изделия, испытываемого в составе группы изделий, определяют по формуле

$$T_1' = T_1 + \Delta T_1.$$

Угловой коэффициент, показывающий, какая доля излучения изделия падает на поверхности рядом расположенных изделий, определяют по формуле

$$\varphi = \frac{1}{n} \left[1 + \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\left(\frac{T_1'}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4} \right].$$

Значение коэффициента n , характеризующего способ расположения изделий при испытаниях, выбирают по ГОСТ 20.57.406–81.

По полученному значению φ из графиков, приведенных на рис. 14.1, определяют значения x , y , по которым рассчитывают минимально допустимое расстояние по следующим формулам: $c = ax$; $y = b/c$.

Минимально допустимое расстояние на рис. 14.1 определяют следующим образом. На оси ординат находят точку, соответствующую рассчитанному по формуле значению φ , из которой проводят прямую, параллельную оси абсцисс. На этой прямой методом последовательных приближений отыскивают точку, положение которой удовлетворяет равенству $xy = b/a$. По абсциссе полученной точки находят значение x и по формуле $c = ax$ определяют минимально допустимое расстояние между изделиями.

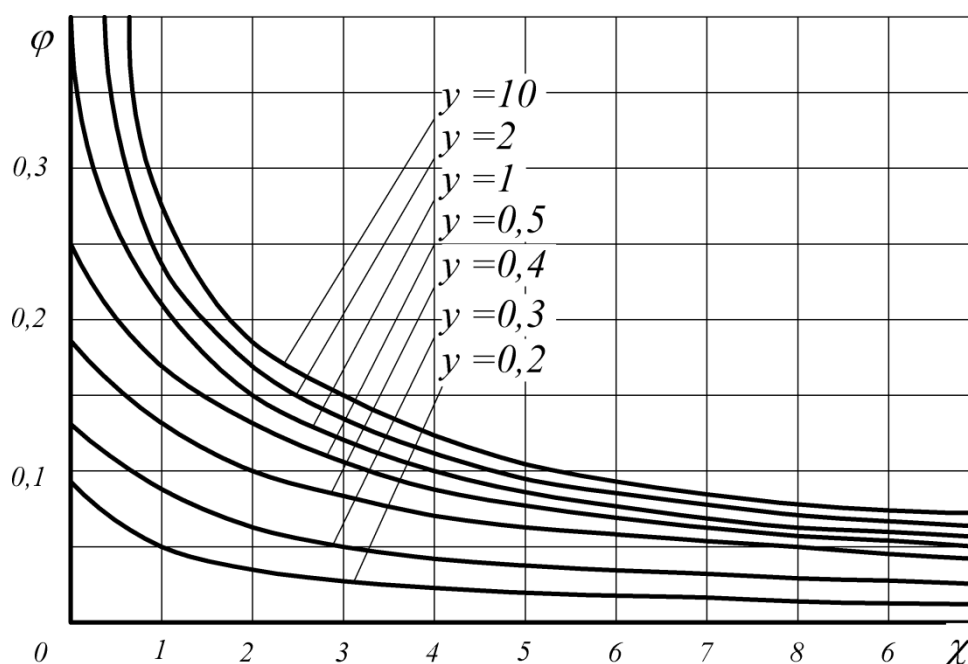


Рис. 14.1. График расчета допустимых расстояний между тепловыделяющими изделиями внутри камеры

Найденное минимально допустимое расстояние между изделиями необходимо выдерживать независимо от их взаимного положения в камере.

При испытании изделий, предназначенных для работы при напряжении ниже $300В$, давление воздуха в барокамеру устанавливают в зависимости от пониженного атмосферного давления и повышенной температуры по ТУ на изделия и ПИ. Затем проводят проверку параметров изделий.

Для изделий, предназначенных для работы при давлении или выше $0,67$ $кПа$ и напряжении не ниже $300В$, давление в термобарокамере плавно снижают от $1,33$ $кПа$ до значения, установленного в стандартах, ТУ на изделия и ПИ. В течение всего времени изменения давления проверяют параметры, зависящие от электрической прочности воздушных промежутков.

При испытании изделий, предназначенных для работы при давлении не выше $0,67$ $кПа$ и напряжении не ниже $300В$, давление в барокамере устанавливают $1,33$ $кПа$. Затем давление плавно снижают до номинального значения, при этом в течение всего времени изменения давления проверяют параметры, зависящие от электрической прочности воздушных промежутков. Перечень этих параметров устанавливают в стандартах, ТУ на изделия и ПИ.

Изделие выдерживают в условиях пониженного давления воздуха и повышенной температуры в течение времени, указанного в стандартах и ПИ. По истечении времени выдержки проверяют параметры, не извлекая изделия из камеры.

Испытание на воздействие повышенного давления воздуха или другого газа проводят следующим образом. Изделие помещают в барокамеру, давление в которой доводят до заданного значения, выдерживают при этом давление в течение времени, установленного в стандартах, ТУ или ПИ, и проводят проверку параметров изделия; давление в камере плавно снижают до нормального, после чего изделие извлекают из камеры, подвергают внешнему осмотру и проверяют параметры.

Изделия считают выдержавшими испытание, если в процессе испытания и после него они удовлетворяют требованиям, установленным в ТУ, стандартах и ПИ для данного вида испытаний.

При составлении требований и основных положений к проведению испытаний на воздействие атмосферного давления используют ГОСТ 24631–81 и ГОСТ 20.57.406–81.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие повышенного давления воздуха?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие повышенного давления воздуха?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие повышенного давления воздуха?

15. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Испытание проводят для проверки сохранности внешнего вида изделий или их отдельных деталей и узлов, а также их параметров после воздействия солнечного излучения. Облучение изделий, их узлов или деталей (кожухов, крышек, ручек, шкал и т.п.) осуществляют в камере СО-1 (0,5) солнечной радиации источниками инфракрасного и ультрафиолетового излучения.

Изделие в камере располагают так, чтобы наиболее уязвимые части его находились под воздействием источника облучения, и не было взаимной экранизации. Спектр ультрафиолетового излучения должен лежать в пределах 280...400 нм. Интегральная плотность теплового потока солнечного излучения должна составлять $1120 \text{ Вт/м}^2 \pm 10 \%$, в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра $68 \text{ Вт/м}^2 \pm 25 \%$. Концентрация озона в камере не должна превышать нормальную (ГОСТ 15150–69).

Если основной целью испытания является проверка воздействия ультрафиолетовой части спектра, испытание проводят следующим образом. Изделия помещают в камеру, включают источники ультрафиолетового излучения, после

чего температуру воздуха в камере (в тени) устанавливают 55 ± 2 °С. Изделия облучают в течение 120 ч непрерывно или с перерывами. Режим испытания на воздействие солнечной радиации режиму, график которого указан на рис. 15.1, при этом продолжительность испытания составляет 10 циклов.

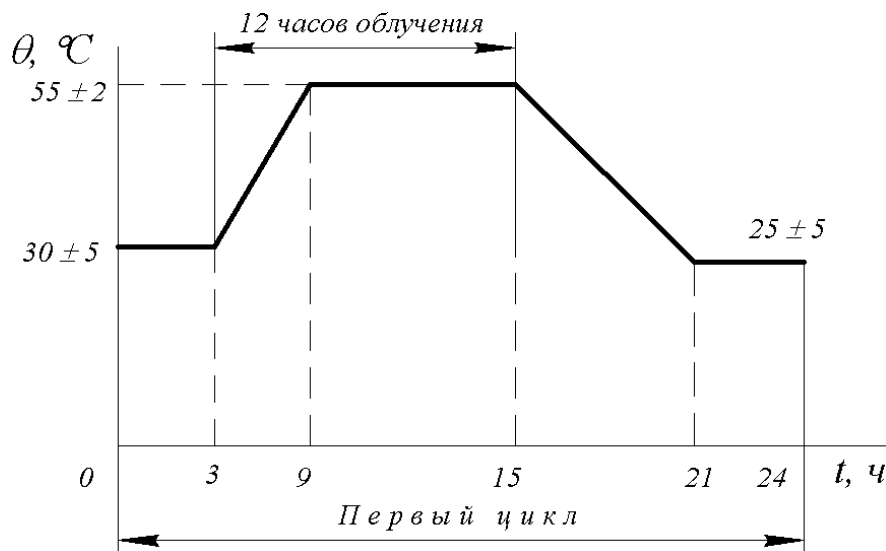


Рис.15.1. Режим испытания на воздействие солнечной радиации

По окончании испытания изделия вынимают из камеры и проводят их внешний осмотр и измерение параметров указанных в стандартах, технических условиях или программе испытаний. Контролю подлежат только те параметры, стабильность которых зависит от состояния конструктивных деталей или узлов из органических материалов (или имеющих органические покрытия) и подвергающихся непосредственному облучению. Изделия считаются выдержавшими испытания, если в процессе и после испытаний они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и технических условиях на изделия и программе для данного вида испытаний.

Радиационная стойкость характеризует свойство аппаратуры, комплектующих элементов и материалов выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после действия ионизирующего излучения (ГОСТ 18298–79).

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие солнечного излучения?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие солнечного излучения?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие солнечного излучения?

16. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЫЛИ

Испытание проводят для проверки устойчивости изделий к разрушающему (абразивному) воздействию пыли, т.е. проверки пыленепроницаемости изделий и их работоспособности в условиях воздействия среды с повышенной концентрацией пыли (песка). По степени защищенности от проникновения пыли изделия выпускают в двух исполнениях: П1 и П2 (ГОСТ 17785–72).

Изделия должны быть работоспособны и сохранять свои метрологические характеристики при воздействии пылевой смеси с частицами размерам не более 200 мкм, движущейся со скоростью 5 м/с, при следующих условиях:

П1 – при атмосферном давлении внутри корпуса изделия;

П2 – при разрежении внутри корпуса изделия 2000 Н/м²;

испытания электротехнических изделий проводят по ГОСТ 14254–80 (СТ СЭВ 778–77).

Испытание изделий на воздействие пыли проводят в пыленепроницаемой камере, полезный объем которой должен превышать объем испытуемого изделия не менее чем в пять раз. В камеру, снабженную устройством для непрерывной циркуляции воздуха со скоростью 0,5...15 м/с, перед испытаниями загружают пылевую смесь объемом 0,1 % полезного объема камеры.

Существует два метода испытаний на воздействие пыли:

- испытание аппаратуры на воздействие статической пыли (песка);

- испытание на воздействие динамической пыли (песка).

Испытание аппаратуры при воздействии статической пыли проводят для проверки способности изделий работать в среде с повышенной концентрацией пыли.

Изделия помещают в камеру и располагают на решетчатом столе таким образом, чтобы воздействие пыли было наиболее эффективным и соответствовало возможному воздействию пыли в условиях эксплуатации. Способ установки изделий указывают в стандартах, ТУ на изделие или программах испытаний (ПИ).

Температура воздуха в камере должна быть 55 ± 3 °С при относительной влажности не более 50 %. Пылевая смесь должна состоять из флюоресцирующего порошка (10 %), например, люминофора ФКП-03 (сульфид цинка), проходящего через сито с сеткой № 005, кварцевого песка (60 %), мела (15 %), каолина (15 %), проходящего через сито с сеткой № 014, (ГОСТ 6613–73). Скорость циркуляции воздуха в камере до начала оседания пыли должна быть 0,5...1 м/с.

Концентрацию пыли при испытаниях определяют с помощью прибора (рис. 16.1), представляющего собой полый параллелепипед, изготовленный из листов органического стекла толщиной 2...4 мм.

Прибор устанавливают в любом участке камеры, в которой испытывают изделия. Пыль проникает через пять круглых отверстий и собирается в приборе. После циркуляции воздуха в камере в течение 5 мин и последующего оседания пыли в течение 2 ч определяют количество пыли, собранной в приборе. По условиям испытания масса пыли должна составлять 25 ± 5 г.

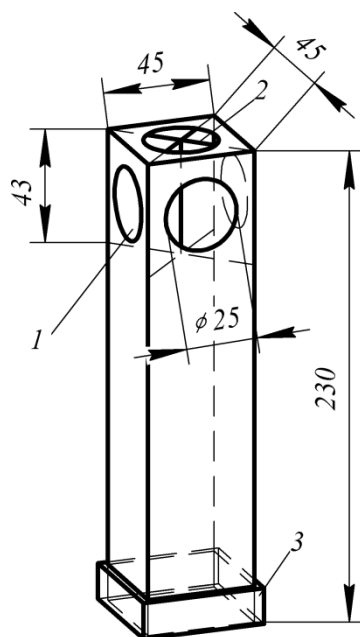


Рис. 16.1. Прибор для определения концентрации пыли: 1 – направляющие перегородки; 2 – входные отверстия; 3 – съемное дно

После испытания изделие извлекают из камеры, удаляют пыль с наружных поверхностей, вскрывают и облучают ультрафиолетовым светом, чтобы установить проникшую в изделие пыль. При этом рекомендуется пользоваться лампами ультрафиолетового излучения типа ПРК со светофильтрами марки УФС.

Испытание на воздействие динамической пыли проводят для проверки устойчивости изделий к разрушающему (абразивному) воздействию пыли.

Изделия помещают в камеру пыли и располагают таким образом, чтобы воздействие пыли было наиболее эффективным и соответствовало возможному воздействию пыли в условиях эксплуатации.

Изделия подвергают воздействию пылевой смеси, находящейся во взвешенном состоянии в камере в течение 4 ч. Затем в течение 2 ч происходит осе-

дание пыли без циркуляции воздуха в камере. Пылевая смесь содержит кварцевый песок (70 %), мел (15 %) и каолин (15 %), проходящий через сито с сеткой № 0224 по ГОСТ 6613–73.

Скорость циркуляции воздуха в камере до оседания пыли должна быть 10...15 м/с. Изделие считается выдержавшим испытание, если в процессе или после испытания его параметры удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и программах испытаний (ПИ).

Требования по работоспособности или пыленепроницаемости при статическом или динамическом воздействии пыли предъявляют к изделиям категории 1 исполнений ТС, О и В. К изделиям других категорий и исполнений эти требования предъявляют в тех случаях, когда это указывается в техническом задании (ТЗ) или программах испытаний (ПИ).

Методы определения защитных свойств и обработки результатов испытания на пыленепроницаемость упаковки, а также тип прибора, измеряющего концентрацию порошкообразных веществ (сульфида цинка, кадмия и серебряного активатора) в рабочем объеме камеры, устанавливает ГОСТ 24981–81 (СТ СЭВ 2810–80).

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие пыли?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие пыли?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие пыли?

17. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ

Испытание проводят для определения способности изделий или их отдельных узлов и сборочных единиц противостоять развитию грибковой плесени.

Сущность метода испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов заключается в выдерживании аппаратуры, зараженной спорами плесневых грибов, в условиях, оптимальных для их развития с доследующей оценкой грибоустойчивости. Необходимость проведения испытаний указывается в нормативно-технической документации (НТД) и программах испытаний (ПИ).

Испытания на грибоустойчивость проводят по ГОСТ 9.048–75 на образцах, которые не подвергались климатическим и механическим видам испытаний. Число испытываемых образцов устанавливают в соответствии с НТД или ПИ.

Испытание проводят следующим образом:

1. Перед испытанием поверхность образцов (изделий, деталей или узлов) тщательно протирают (промывают) спиртом-ректификатом. Для протирки используют бязь или марлю. Работу следует проводить в резиновых перчатках. Затем образцы высушивают, после чего выдерживают в нормальных климатических условиях испытаний. При этом должны быть приняты меры, исключая возможность заражения образцов.

2. Образцы помещают в камеру грибообразования или в эксикаторы. Антисептированные образцы (в том числе и изделия, содержащие отдельные антисептированные детали) испытывают отдельно от неантисептированных. Вместе с образцами ставят контрольную чашку Петри (ГОСТ 23932–79) с питательной средой для контроля жизнеспособности спор грибов. Состав и порядок приготовления питательной среды приведены в прил. 1 и 11 ГОСТ 9.048–75, ГОСТ 16962–71.

3. Образцы, а также контрольную чашку Петри с питательной средой опрыскивают водной суспензией спор грибов из стеклянного пульверизатора с диаметром входного отверстия не менее 1 мм.

4. Испытание проводят при температуре 29 ± 2 °С и относительной влажности 95 ± 3 % при отсутствии циркуляции воздуха (допускается кратковременное перемешивание воздуха), образцы должны быть затемнены от действия искусственного и естественного света.

5. Через 48 ч проводят осмотр контрольных чашек Петри.

Распространение и размножение плесени осуществляется спорами, размеры которых не превышают 10 мкм. Размножение идет насколько быстро, что в течение нескольких дней небольшое грибковое образование дает несколько миллионов новых спор. О признаках созревания спор судят по специфической для каждого вида окраски плесени, приведенных ниже:

- *Aspergillusniger* (V. liegh) – черная;
- *Aspergillusamstelodami* (Mong) – ярко-желтая;
- *Penicilliumsyslopiurn* (Westl) – зеленая;
- *Penicilliumbrevicomactum* (Dierckx) –

окраскаменяетсяотбелойдорозовой, лососевойибурой: вспороноснойобластиколонии – зеленогоцвета;

- *Paecilomycesvarioti* (Bain) – желтовато-бурая;
- *Stachybotryesatra* (Corda) – черная;
- *Chaetomiumglobosum* (Kunze) – серо-коричневая;
- *Aspergillum versicolor* (Tierab) – сине-зеленая;

- *Aspergillum flavus* (Zink) – серая;
- *Trichodermalignorum* (Harz) – зеленая.

Если на чашках не наблюдается роста грибов из числа видов, использованных для заражения, то следует провести вторичное опрыскивание изделий жизнеспособной суспензией спор грибов. Срок испытания в этом случае следует считать со времени вторичного опрыскивания. Продолжительность испытаний 30 суток.

6. После испытания образцы извлекают из камеры и подвергают визуальному осмотру. Образцы считают выдержавшими испытание, если рост плесени практически не виден невооруженным глазом (при 56-кратном увеличении может наблюдаться слабый рост мицелия и единичное спороношение).

Степень биологического обрастания испытуемых образцов оценивают по 5-балльной системе:

0 – нет роста грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении не обнаруживается роста грибов;

1 – очень слабый рост грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении наблюдаются единичные и проросшие споры;

2 – слабый рост грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении наблюдается слабый рост мицелл и единичное спороношение;

3 – умеренный рост грибов; невооруженным глазом на образцах видны очаги плесени;

4 – обильный рост грибов; невооруженным глазом видно сплошное поражение грибами поверхности образцов.

По окончании испытания образцы должны быть продезинфицированы или уничтожены.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие плесневых грибов?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытания?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие плесневых грибов?
4. Как оцениваются результаты испытаний?

18. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель испытания – определение способности изделий сохранять свои параметры в условиях пребывания под водой. Испытание проводят следующим образом:

1. Изделия помещают в бак, в котором создают гидростатическое давление, установленное в ТЗ или стандартах.

2. При этом давлении изделия выдерживают в течение 15 мин, после чего давление снижают до нормального. Затем давление повторно повышают до значения, соответствующего предельной глубине погружения. Изделия выдерживают при этом давлении в течение 24 ч, причем в конце проводят измерение параметров указанных в стандартах и ПИ для данного вида испытаний, после чего давление снижают до нормального и, не извлекая изделий из воды, проверяют параметры, указанные в стандартах и ПИ. После извлечения из воды изделие отбирают и проводят проверку параметров, указанных в стандартах и ПИ.

3. Изделия считают выдержавшими испытание, если в процессе и после испытания они удовлетворяют требованиям, установленным, в НТД или ПИ.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие повышенного гидростатического давления?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие повышенного гидростатического давления?

19. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛЯНОГО ТУМАНА

Испытание проводят в целях определения коррозионной стойкости изделий в атмосфере, насыщенной водными растворами солей.

Изделия помещают в камеру, температуру в которой устанавливают равной 27 ± 2 °С, и подвергают воздействию соляного тумана. Изделия располагают в камере КСТ-1М так, чтобы в процессе испытания брызги раствора из пульверизатора или аэрозольного аппарата, а также капли с потолка, стен и системы подвесов не попадали на изделия.

Если изделие эксплуатируют в защитной оболочке, оно должно испытываться в ней. Туман образуется распылением центробежным аэрозольным ап-

паратом или пульверизатором соляного раствора, который готовят, растворяя в дистиллированной воде хлористый натрий по ГОСТ 4233–77. Раствор распыляют в течение 15 мин через каждые 45 мин.

Туман должен обладать дисперсностью 1...10 мкм (95 % капель) и водностью 2...3 г/мм³. Методы определения дисперсности и водности соляного тумана приведены в ГОСТ 15151–69, ГОСТ 16962–71.

Водность определяют прибором Зайцева, работающим по принципу инерционного оседания капель тумана на специальную фильтровальную бумагу, пропитанную красящим веществом. При просасывании определенного объема воздуха, содержащего туман, на фильтровальной бумаге образуется пятно, по размеру которого на основании переводных градуировочных таблиц определяется содержание капельножидкой влаги в единице объема.

По окончании испытаний изделия промывают в дистиллированной воде, если это указано в ПИ или стандартах на изделие, после чего они должны быть просушены.

Общее время испытания составляет 2, 7 или 10 суток. Конкретное время испытания устанавливается в стандартах и ПИ на изделие.

Изделия считают выдержавшими испытания, если они по внешнему виду удовлетворяют требованиям ТЗ или стандарта на изделия для данного вида испытаний.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие соляного тумана?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие соляного тумана?

20. ИСПЫТАНИЕ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДЫ

Испытание проводят для проверки устойчивости параметров изделий воздействию брызг, струй, дождя или к пребыванию в воде.

По степени защищенности от воздействия воды изделия выпускают в четырех исполнениях (ГОСТ 17786 – 72): В1, В2, В3, В4.

Изделия должны быть работоспособны и сохранять метрологические характеристики при следующих условиях:

- В1 – при воздействии дождя падающего под углом не более 60° к вертикали;
- В2 – при воздействии брызг воды, падающих в любом направлении;

- В3 – при воздействии струй воды, падающих в любом направлении;
- В4 – при полном погружении в воду.

Испытание изделий исполнения В1 проводят на испытательной установке (рис. 20.1).

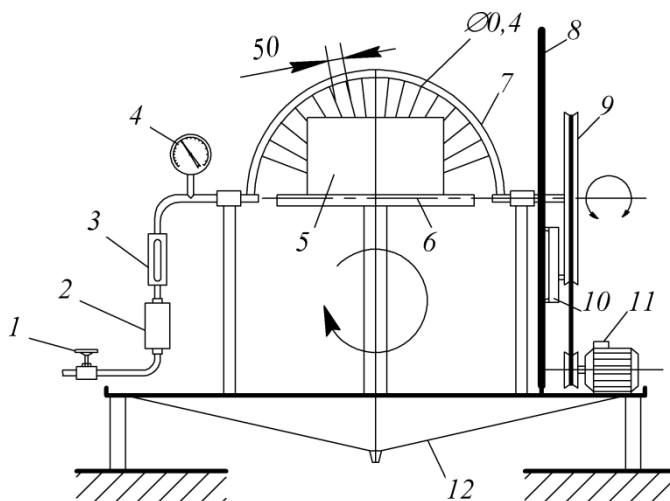


Рис. 20.1. Схема установки для испытания аппаратуры: 1 – вентиль по ГОСТ 18722–73; 2 – фильтр; 3 – ротаметр по ГОСТ 13045–81; 4 – манометр по ГОСТ 240580 (СТ СЭВ 1641–79); 5 – испытуемая аппаратура; 6 – стол; 7 – трубка по ГОСТ 617–72 или ГОСТ 18475–73; 8 – защитный щиток; 9 – шкив; 10 – щиток конечных выключателей; 11 – электродвигатель реверсивный по ГОСТ 16264–78Е; 12 – поддон для слива воды

Путем подачи на изделие воды, проходящей через отверстия в качающейся трубке. Трубка с внутренним диаметром 18 мм в виде полукольца имеет по всей длине на ее внутренней стороне отверстия диаметром 0,4 мм, расположенные через 50 мм. Трубка совершает колебательные движения с отклонением на угол 60° от вертикали в обоих направлениях со скоростью 1,05 рад/с (60° в 1 с). Радиус дуги трубки должен быть наименьшим в зависимости от габаритных размеров изделий (выбирается из ряда 160, 250, 400, 630 мм). Давление воды у входа в трубку 0,1 МН/м².

Изделие устанавливают на решетчатом столе, обеспечивающем прохождение воды к изделию, вращающемуся вокруг вертикальной оси с частотой 1 об/мин. Продолжительность воздействия 10 мин. Во время испытания изделие должно поворачиваться вокруг вертикальной оси.

Интенсивность дождя измеряют в месте расположения изделий в течение не менее 30 с с помощью цилиндрического сборника диаметром от 10 до 20 см и высотой не менее половины диаметра.

Внутри камеры КД-0,4 в точках, обозначенных на рис. 20.2, устанавливают мерные стаканы с внутренним диаметром 200 мм и высотой 100 мм. Затем переключатель режимов устанавливают в положение "Р" и задают интенсивность дождя 3 мм/мин. Делают три замера (длительность каждого замера 5 мин). После этого задают интенсивность дождя 10 мм/мин и выполняют три замера (длительность каждого замера 5 мин).

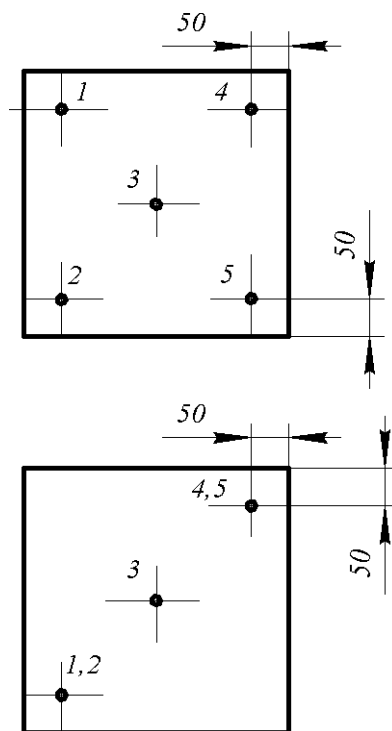


Рис. 20.2. Расположение датчиков

Действительную интенсивность дождя в мм/мин определяют по формуле

$$\gamma' = H / t,$$

где H – высота столба воды в стакане, мм; t – длительность дождя, мин.

Точность поддержания интенсивности дождя по ТУ определяют по формуле

$$\Delta\gamma = \gamma - \gamma',$$

где γ – заданная интенсивность дождя, мм/мин.

Испытания изделий исполнения В2 на брызгозащищенность проводят по методике, приведенной выше для исполнения В1 при условии, что качающаяся трубка отклоняется на угол 170° от вертикали в обоих направлениях со скоро-

стью 1,48 рад/с. Обрызгиванию продолжительностью 10 мин подвергают поочередно четыре основные стороны изделия. При размещении в испытательной установке необходимо учитывать эксплуатационное положение.

Зона действия брызг должна перекрывать габаритные размеры изделий не менее чем на 30 см, направление падения должно составлять угол, 45° с плоскостью расположения изделий.

Температура воды в начальный момент испытаний должна быть ниже температуры, изделий на $10...15^\circ\text{C}$.

Изделия в течение 2 ч подвергают; действию брызг с интенсивностью 5 или 3 мм/мин.

Изделия, которые в условиях эксплуатации могут подвергаться непосредственному воздействию брызг, должны быть устойчивы к воздействию, верхнее значение интенсивности которого 5 мм/мин за исключением изделий, рассчитанных на напряжение свыше 1000 В в исполнениях для умеренного и холодного климата (исполнения У и ХЛ), для которых верхнее значение интенсивности брызг составляет 3 мм/мин.

Испытание изделий водозащищенного исполнения В3 проводят для проверки способности их оболочек (кожухов) не пропускать воду при накате волны. Для этого изделие обливают поочередно со всех сторон струей воды из цилиндрической насадки с расстояния 1,5 м от изделия. Давление воды перед насадкой должно быть $0,2\text{ МН/м}^2$, диаметр отверстия насадки 25 мм, длина насадки 50...75 мм. Продолжительность воздействия 15 мин.

Испытание изделий исполнения В4 на водонепроницаемость проводят для проверки устойчивости параметров изделий после пребывания их в воде. Для этого изделие опускают в воду, имеющую температуру $20 \pm 10^\circ\text{C}$, на глубину 0,5...1,0 м. Продолжительность воздействия воды должна быть не менее 30 мин.

После испытаний внешние поверхности изделия насухо протирают, вскрывают, чтобы установить отсутствие влаги внутри корпуса.

Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если после испытаний внутри изделия не будет обнаружено следов воды и параметры соответствуют параметрам и требованиям, указанным в стандартах и ПИ для данного вида (В1, В2, В3, В4) исполнений.

Допускается по согласованию между изготовителем и потребителем проводить ускоренные испытания путем создания внутри изделия избыточного давления воздуха, равного $0,05\text{ МН/м}^2$. При этом продолжительность воздейст-

вия воды 1 мин. Испытания считаются удовлетворительными, если во время испытаний воздух не выходит из корпуса

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие воды?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний?
3. Какова процедура проведения испытаний на внешнее воздействие воды?

21. ИСПЫТАНИЕ НА ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТЬ

Ветроустойчивостью называют способность аппаратуры при воздействии ветра сохранять свои характеристики в пределах норм, установленных в стандартах, ТУ или ПИ.

Согласно ГОСТ 22261–76 для 4 – 7-й групп в ТУ допускается устанавливать требования по ветроустойчивости.

Испытания средств измерений 4 – 7-й групп на ветроустойчивость проводят следующим образом:

– после измерений в нормальных условиях характеристик, установленных для испытаний данного вида в стандартах и (или), ТУ, средство измерений выключают и устанавливают в рабочем положении в аэродинамической трубе или под вентиляционной установкой, обеспечивающих воздушный лоток со скоростью не менее 30 м/с;

– изделие включают и обдувают его воздушным потоком под разными углами (через 45°) по 5...10 мин в каждом положении (в направлении наибольшей парусности продолжительность обдува должна быть 20 мин);

– при воздействии воздушного потока проверяют требуемые характеристики; – прекращают подачу воздуха и выключают средство измерений;

– изделие второй раз обдувают воздушным потоком со скоростью не менее 50 м/с под углами через 45° по 5...10 мин в каждом положении (в направлении наибольшей парусности продолжительность обдува должна быть 20 мин);

– после пребывания в нормальных условиях применения в течение времени, установленного в стандартах или ТУ, средство измерений включают и по истечении времени установления рабочего режима проверяют требуемые характеристики.

В том случае, когда ветер является существенно воздействующим фактором на изделие, при его разработке и испытании необходимо рассматривать характеристики ветра по ГОСТ 24728–81.

Характеристики ветра распределяются по четырем широтным зонам и представительным пунктам с экстремальными сильными и слабыми ветрами в каждой широтной зоне и рассчитываются по геопотенциальным высотам (ГОСТ 4401–81).

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на ветроустойчивость?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний?
3. Какова процедура проведения испытаний на ветроустойчивость?

22. ИСПЫТАНИЕ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Герметичностью называют способность оболочки (корпуса), отдельных ее элементов и соединений препятствовать газовому или жидкостному обмену между средами, разделенными этой оболочкой.

Испытания на герметичность проводят для определения степени герметичности изделия или его частей, узлов и блоков.

Требования к степени герметичности должны быть определены при разработке конструкции. Степень герметичности должна характеризоваться потоком газа, расходом или наличием истечения жидкости, падением давления за единицу времени, размером пятна и тому подобными величинами, приведенными к рабочим условиям по ГОСТ 24054–80 и ГОСТ 20.57.406–81.

Метод испытаний на герметичность выбирают в зависимости от назначения изделия, его конструктивно-технологических особенностей, требований к степени герметичности, а также экономических характеристик испытаний.

Испытания на герметичность включают в технологический процесс изготовления изделия таким образом, чтобы предшествующие технологические операции не приводили к случайному перекрытию течей. При невозможности исключить опасность случайного перекрытия течей в технологическом процессе необходимо предусмотреть операции, обеспечивающие освобождение течей от закупорки.

Метод или программа испытаний на герметичность указаны в стандартах, ТУ или ПИ на изделия конкретного вида.

В зависимости от рода пробного вещества методы испытаний на герметичность подразделяются на две группы: *газовые и жидкостные*.

К газовой группе относятся следующие методы испытаний:

- разноактивный;
- манометрический;
- массоспектрометрический;
- галогенный;
- пузырьковый;
- ультразвуковой;
- катодометрический;
- химический;
- инфракрасный;
- параметрический.

К жидкостной группе относятся следующие методы:

- гидростатический;
- люминесцентный (цветной);
- электрический;
- параметрический.

Реализация указанных методов возможна следующими способами:

- компрессионным;
- камерным;
- вакуумным;
- капиллярным;
- обдува;
- щупа;
- обмыливания;
- нагревания;
- внешней опрессовки;
- опрессовки замкнутых оболочек;
- в камере.

Классификация наиболее распространенных методов испытаний на герметичность и их общая характеристика приведены в справочном приложении 2 ГОСТ 24054–80.

Метод должен обеспечивать проведение испытаний в условиях отвечающих требованиям действующей НТД по технике безопасности и промышленной санитарии.

Испытания герметичности изделий и средств измерений проводят одним из следующих методов (ГОСТ 5197–70, ГОСТ 20.57.406–81, ГОСТ 24054–80 и публикации МЭК 68-2–17):

- проверка по обнаружению утечки жидкости (гидростатический метод);
- проверка по обнаружению утечки газа масс-спектрометром, в том числе изделий, имеющих свободные внутренние объемы изделий, представляющих собой герметичные перегородки уплотнения (массовый спектрометрический, химический методы);
- проверка по проникновению жидкости и газа (параметрический метод);
- проверка по обнаружению утечки газа, в том числе путем обнаружения утечки воздуха или другого газа из внутренних областей изделия при погружении его в жидкость с пониженным давлением и при повышенной температуре (пузырьковый, катодометрический методы);
- проверка по обнаружению, утечки воздуха, подаваемого на изделие под давлением (манометрический метод);
- проверка путем проникновения паров влаги (влажностный метод).

Подготовка изделия к испытаниям на герметичность предусматривает устранение последствий случайного перекрытия течей после хранения, транспортирования и операций, предшествующих испытаниям.

Для испытаний на герметичность необходимо использовать оборудование, укомплектованное специальными присоединительными и установочными деталями и калиброванными течами в соответствии с ТУ на изделия конкретного вида.

Испытание на герметичность изделий вакуумным способом пузырькового метода проводят следующим образом. Изделие погружают в ванну с индикаторной жидкостью, находящуюся внутри барокамеры, которая должна обеспечивать испытательный режим. Количество жидкости в ванне должно быть достаточным, чтобы исследуемая поверхность была погружена на глубину не менее 50 мм. Температура испытательной жидкости 15...35 °С, кинематическая вязкость 25 сСт при 20 °С. Давление в камере снижают до 0,1...1,0 кПа.

Изделие считают выдержавшим испытание, если пузырьки газа не выделяются.

Порог чувствительности (наименьший регистрируемый поток газообразного вещества или расхода жидкого вещества) при индикации потока газа определяют по формуле

$$\gamma = \frac{md_{\min}}{\sigma\tau} \left(\frac{4\sigma}{d_{\min}} + \rho gh + P_s \right),$$

где m – масса пузырька; d_{min} – наименьший регистрируемый диаметр пузырька; σ – коэффициент поверхностного натяжения; τ – время от момента образования пузырька до его отрыва; ρ – плотность индикаторной жидкости; g – ускорение свободного падения; h – высота слоя индикаторной жидкости; P_g – давление в вакууммированном пространстве над слоем индикаторной жидкости.

Испытание на герметичность изделий камерным способом манометрического метода проводят следующим образом. Изделие (или партию изделий) помещают в камеру, заполняют ее пробным газом под давлением и выдерживают в течение определенного времени, устанавливаемого в стандартах, ТУ или ПИ. До заполнения камеры гелием допускается снижение давления до 0,1 кПа и выдерживание в течение 30 мин при этом давлении.

Изделия извлекают из камеры и выдерживают в течение 20 мин в условиях, обеспечивающих удаление гелия, адсорбированного внешними поверхностями. Затем изделия помещают в камеру, соединенную с масс-спектрометром, и измеряют скорость утечки гелия. Измеренное значение сравнивают со значением скорости утечки гелия, указанной в стандартах и ТУ или ПИ на изделие.

В этом случае порог чувствительности при индикации потока газа определяют по формуле

$$\gamma = V_k \Delta P_{min} / t,$$

где V_k – объем камеры; ΔP_{min} – нижний предел измерения манометра; t – продолжительность испытания.

Изделия считают выдержавшими испытание, если скорость утечки гелия меньше или равна значению, указанному в стандартах и ТУ или ПИ на изделие.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на герметичность?
2. Какие методы применяются при проведении испытаний на герметичность?

23. МНОГОФАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

При эксплуатации изделий на него воздействует множество внешних и внутренних, факторов:

- климатических (температура, влага, пыль, соляной туман, атмосферное давление и др.);
- механических и акустических (вибрации, удары, ускорения);
- магнитных;

- электрических;
- биологических;
- изменений режимов работы, колебаний питающих напряжений и т.д.

Нередко эти факторы действуют в комплексе. Поэтому, прежде всего, возникает вопрос, каковы должны быть условия при климатических испытаниях, а именно возможное сочетание, диапазон изменения, число воздействующих факторов, продолжительность испытаний на каждом уровне факторов и их сочетаний, объем выборки испытуемых изделий.

Уже этот, далеко не исчерпывающий, перечень условий показывает, что интуитивный выбор испытаний, как правило, дает результаты, весьма далекие от оптимальных.

При многофакторных испытаниях влияние взаимодействия факторов на изделие отличается от суммы одиночных воздействий. Определить значение такого взаимодействия можно только путем проведения соответствующих испытаний при одновременном воздействии факторов.

Постановка задачи и планирование многофакторных испытаний подробно рассматривается в литературе [2], где числовые значения показателей качества изделия определяются условиями их применения. Поэтому основным вопросом при организации климатических испытаний является определение условий, в которых должны испытываться изделия.

Необходимо отметить, что одной из задач многофакторного испытания изделий является экспериментальное определение зависимости выходных параметров (отклика) испытуемого образца от воздействия совокупности влияющих факторов. При этом необходимо с требуемой точностью определить степень влияния каждого воздействующего фактора и их корреляции. Однако взаимодействия не могут быть оценены по результатам эксперимента, так как в большинстве случаев однофакторные эксперименты требуют длительного времени для полного исследования испытуемых изделий.

Поэтому для исследования результатов испытаний изделий применяют теорию оптимального планирования многофакторного эксперимента. Исследование включает в себя построение математической модели для испытуемого объекта в воздействующей среде при многофакторном эксперименте.

Исследованием окружающих условий не заканчивается выбор варьируемых факторов. В процессе исследования предполагаемых условий испытаний нужно установить, какие механические, климатические, биологические внешние воздействующие факторы могут влиять на выходные характеристики изделий. С этой целью во многих случаях исследование целесообразно начинать с

постановки многофакторных экспериментов, по результатам которых можно выделить доминирующие факторы. Кроме того, исключительно большое значение на выбор факторов оказывают технические возможности испытательных камер и стендов.

Экономически целесообразно создавать установки, позволяющие имитировать все условия испытаний. При этом за основные следует брать факторы, воздействия которых являются определяющими для работоспособности изделий данного типа.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под многофакторными испытаниями?
2. Какие факторы оказывают влияние на выбор условий и оборудования для проведения многофакторных испытаний?

24. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

При статических испытаниях для определения характеристик прочности и пластичности образец исследуемого материала подвергают действию постоянной или медленно и плавно (квазистатически) повышающейся нагрузкой.

Наряду с простыми способами нагружения, применяют также статистические испытания в условиях многоосного или комбинированного нагружения.

В зависимости от продолжительности испытания подразделяют на кратковременные и длительные.

24.1. Испытания на растяжение

24.1.1. Диаграмма «Напряжение – Деформация»

Из всех способов механических и технологических испытаний, наибольшее распространение имеют испытания на растяжение. Их применяют при разработке новых материалов, при расчете их характеристик для определения размеров статически нагружаемых деталей и для контроля качества материалов. При этих испытаниях определяется поведение материала при одноосном нагружении. Растягивающая нагрузка равномерно распределена на всё поперечное сечение образца, при этом гладкий *ненадрезанный* образец растягивают в испытательной машине в направлении оси образца до разрыва, а зависимость между растягивающей силой и изменением длины, регистрируют в виде диаграммы «нагрузка – абсолютное удлинение». Так как, и нагрузка, и абсолютное

удлинение зависят от формы и размеров соответствующих образцов, количественное сравнение материалов по диаграммам «нагрузка – абсолютное удлинение» невозможно. Если нагрузку F отнести к исходному поперечному сечению образца A_0 , а удлинение ΔL – к начальной расчетной длине L_0 , то получим диаграмму «напряжение – относительное удлинение». При этом нормальное напряжение

$$\sigma = F / A_0, \text{ Н / мм}^2 \quad (24.1)$$

и относительное удлинение

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100\% . \quad (24.2)$$

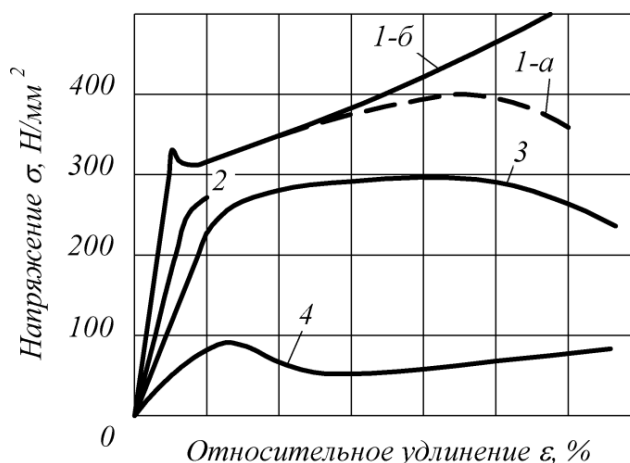


Рис. 24.1. Зависимость напряжения и относительного удлинения

На кривых «напряжение – относительное удлинение» (рис. 24.1) видно, что технические материалы значительно различаются по характеристикам прочности и пластичности.

Прямолинейные начальные части кривых характеризуют область упругих деформаций, в которой при условии квазитропности материалов справедлив закон Гука

$$\Sigma = \varepsilon E, \quad (24.3)$$

где E – модуль нормальной упругости.

В пластичных материалах при напряжениях выше определенного значения происходит постепенный или резкий переход в область пластических де-

формаций. Дальнейшее повышение напряжения для металлических материалов приводит к упрочнению в результате пластической деформации, а для пластмасс – к ориентировке макромолекул, возникающей как следствие вытягивания. Конечная точка кривой напряжение – относительное удлинение соответствует разрушению образца.

При пересчете измеренных нагрузок и удлинений по формулам (24.1) и (24.2) не учитывают, что по мере растяжения поперечное сечение образца постоянно уменьшается. Так как в результате этого при больших деформациях имеются значительные отклонения от рассчитанных по (24.1) и (24.2) напряжений и удлинений, действительно существующих в образце, говорят о диаграмме условное напряжение – деформация. Если же в каждый момент испытания действующую силу F отнести к наименьшему, т.е. наиболее деформированному поперечному сечению A_{ω} , получим истинное напряжение

$$\sigma_{\omega} = \frac{F}{A_{\omega}}, \text{ Н / мм}^2. \quad (24.4)$$

Так же может быть получено истинное относительное удлинение φ через сумму всех элементарных удлинений на длине L

$$\varphi = \int_0^L \frac{dL}{L} = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln \left(\frac{L_0 - \Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 - \varepsilon). \quad (24.5)$$

Так как для $\varepsilon < 0,10$ $\ln(1 - \varepsilon) \approx -\varepsilon$, то относительное удлинение ε и истинное относительное удлинение φ для пластической деформации, меньшей 10 %, совпадают, зависимость между σ_{ω} и ε (или φ) описывается диаграммой истинное напряжение – деформация (рис. 24.1, кривая 1, б). Для большинства металлических материалов истинное напряжение связано с истинным относительным удлинением уравнением

$$a_{\omega} = a\omega^n, \quad (24.6)$$

где a – постоянная; n – показатель деформационного упрочнения.

Зависимость, описанную уравнением (24.6), называют также *кривой текучести*.

В пластичных материалах образуется местное сужение, начало образования которого, можно определить как механическую неустойчивость, при кото-

рой уменьшение поперечного сечения начинает преобладать над упрочнением материала.

$$F = \sigma A_{\omega} \quad (24.7)$$

Из уравнения (24.7) получим изменение нагрузки, необходимое для дальнейшей деформации растягиваемого образца

$$dF = (\sigma dA_{\omega} - A_{\omega} d\sigma). \quad (24.8)$$

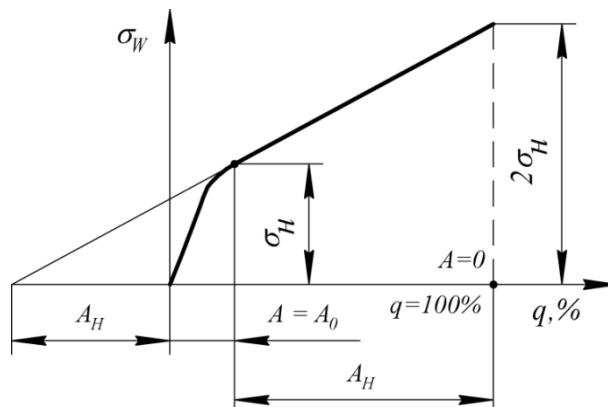


Рис. 24.2. Определение характерных точек на диаграмме истинных напряжений

В точке неустойчивости

$$dF = 0 \quad (24.9)$$

и отсюда

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{dA_{\omega}}{A_{\omega}}. \quad (24.10)$$

На диаграмме истинное напряжение – изменение поперечного сечения q (рис. 24.2) касательная в точке неустойчивости определяется уравнением

$$\sigma - \sigma_n = \frac{\sigma_n}{A_n (A_n - A_{\omega})}. \quad (24.11)$$

где σ_n и A_n – соответственно напряжение и площадь поперечного сечения в точке неустойчивости.

Для $A_{\omega} = 0$, (то есть для $q = 100\%$)

$$\sigma = 2\sigma_n. \quad (24.12)$$

Так как касательная пересекает ось абсцисс на расстоянии A_n , начало механической неустойчивости однозначно определяется по диаграмме истинных напряжений.

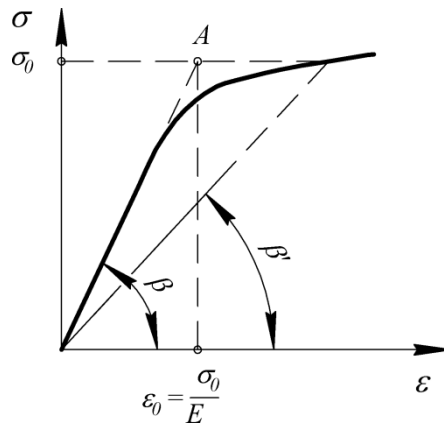


Рис. 24.3. Определение базисных значений для приведенной диаграммы напряжение – деформация: A – полученная точка базисного напряжения; $\operatorname{tg}\beta = E$; $\operatorname{tg}\beta' = 0,7E$

Для сравнения различных материалов полезна также приведенная диаграмма напряжение – деформация, при построении которой все значения напряжения делят на базисное напряжение σ_0 , а все значения относительного удлинения – на базисное относительное удлинение ε_0 . Рамберг и Осгуд предложили выбрать в качестве базисного напряжения σ_0 точку пересечения секущей, тангенс наклона которой на диаграмме напряжение – деформация (рис. 24.3) равен $0,7E$ (E – модуль упругости). Тогда базисное относительное удлинение представляет собой упругое удлинение, соответствующее этому значению напряжения $\varepsilon_0 = E/\sigma_0$. Если нанести безразмерные величины σ/σ_0 и $\varepsilon/\varepsilon_0$ на приведенной диаграмме напряжение – деформация, получим семейство кривых, которые характеризуются одинаковым подъемом и общей точкой пересечения.

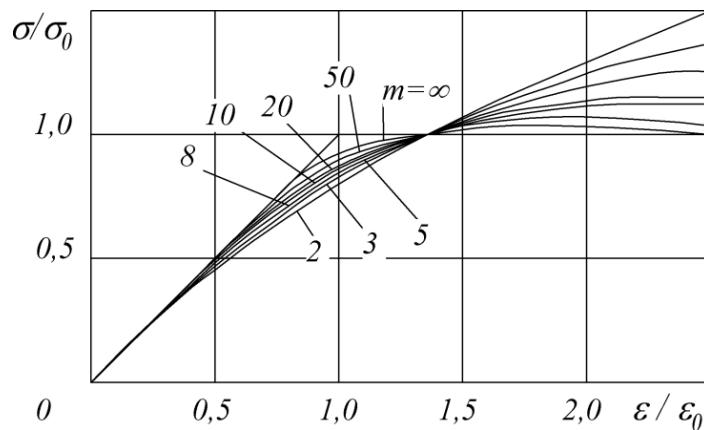


Рис. 24.4. Приведенные кривые напряжение – относительное удлинение для различных материалов m

Из приведенной на рис. 24.4 диаграммы выведем широко распространенное выражение зависимости относительного удлинения от напряжения для случая испытаний на растяжение.

Разделив полуэмпирическое отношение

$$\varepsilon_{ges} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \sigma/E + (\sigma/B)^m \quad (24.13)$$

на ε_0 , получим

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\varepsilon_0 E + 1/\varepsilon_0 (\sigma/B)^m. \quad (24.14)$$

Подставляя $\varepsilon_0 = E/\sigma_0$, получим

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + E/B^m \sigma^m/\sigma_0. \quad (24.15)$$

Так как пластическую деформацию в базисной точке

$$\varepsilon_{pl} = (\sigma_0/B)^m \quad (24.16)$$

можно записать также

$$\varepsilon_{pl0} = \sigma_0/0,7E - \sigma_0/E = 3\sigma_0/7E, \quad (24.17)$$

то получим

$$E/B^m = 3/7 \sigma_0^{1-m} \quad (24.18)$$

и подстановкой в уравнение (24.15) выведем соотношение

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + (3/7 \sigma/\sigma_0)^m. \quad (24.19)$$

24.1.2. Свойства, определяемые при испытаниях на растяжение

Поясним характеристики, определяемые при испытании на растяжение, на примере диаграмм условное напряжение – относительное удлинение (рис. 24.5).

На начальной стадии испытания наблюдается крутой подъем напряжения. Для этого участка диаграммы, соответствующего закону Гука, относительное удлинение пропорционально напряжению.

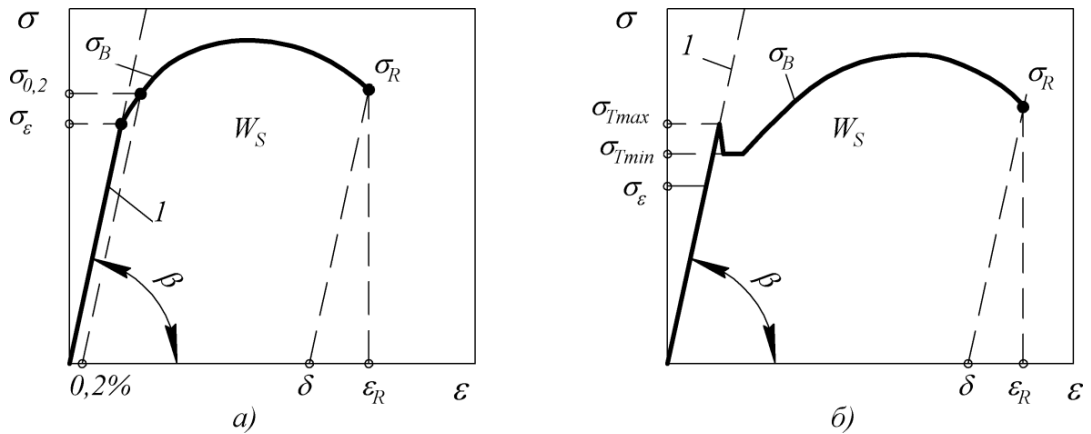


Рис. 24.5. Характеристики, определяемые по диаграммам условное напряжение – относительное удлинение: а – без площадки текучести; б – с четко выраженной площадкой текучести; I – прямая Гука

Введя в качестве коэффициента пропорциональности коэффициент удлинения α , получим

$$\varepsilon = \alpha\sigma. \quad (24.20)$$

Величина, обратная коэффициенту удлинения α , есть модуль упругости E , что определяет идентичность этой формулы закону Гука (24.3). Так как $E = \operatorname{tg}\beta$, то по углу наклона этой прямой можно определить модуль упругости.

Ниже представлены значения модуля упругости E для различных материалов. Следует иметь в виду, что для полимеров закон Гука справедлив только при очень малом времени нагружения (рис. 24.6):

Алмаз	$120 \cdot 10^4$
Вольфрам	$35 \cdot 10^4$
Сталь	$20 \cdot 10^4$
Чугун с пластинчатым графитом	$(5 \dots 12) \cdot 10^4$
Стекло	$(60 \dots 75) \cdot 10^4$
Алюминиевый сплав	$70 \cdot 10^3$
Фарфор	$55 \cdot 10^3$
Бетон	$20 \cdot 10^3$
Эпоксидная смола с кварцевым наполнителем	$(120 \dots 140) 10^2$
Пенопласт (в зависимости от типа и наполнителя).....	$(55 \dots 100) 10^2$
Аминопласт (то же)	$(50 \dots 100) 10^2$
Поливинилхлорид	$(30 \dots 35) 10^2$

Полистирол	$(24...30) \cdot 10^2$
ND – полиэтилен	$(5...11) \cdot 10^2$
НО – полиэтилен	$(0,8...8) \cdot 10^2$
Резина	$< 10^2$

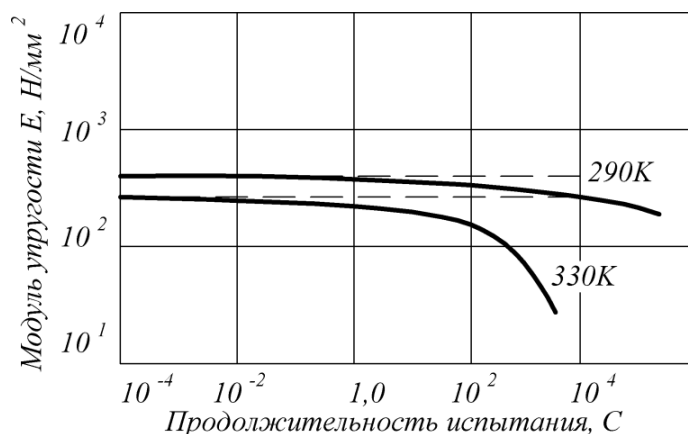


Рис. 24.6. Зависимость модуля упругости полиэтилена от времени

Отношение величины деформации в поперечном направлении ϵ_q к деформации в продольном направлении ϵ при упругом продольном растяжении образца называют коэффициентом Пуассона μ .

Предел упругости ρ_E является максимальным напряжением, при котором после разгрузки образца остаточное изменение еще не возникает. Точно определить это значение практически невозможно, поэтому техническим условным пределом упругости называют напряжение, при котором появляется остаточная деформация, равная 0,01 % ($\sigma_{0,01}$). Для точных измерений возможно также определение условного предела упругости при допуске остаточной деформации 0,005 % ($\sigma_{0,005}$).

За пределом упругости в металлических поликристаллических материалах начинается пластическая деформация, развивающаяся вначале в отдельных кристаллитах (микропластичность). Поэтому кривые напряжение – деформация отклоняются от прямой, т.е. повышение напряжения отстает от роста деформации. Переход от микропластичности к макроскопическому течению для мягких углеродистых сталей и некоторых других материалов различают по ярко выраженному отклонению от монотонного хода кривых нагрузка – удлинение или напряжение – деформация.

Соответствующее напряжение называют пределом текучести σ_m и определяют его как отношение к начальному поперечному сечению образца нагруз-

ки F_m , при которой на кривой нагрузка – удлинение обнаруживается немонотонность при одновременном появлении заметной остаточной деформации

$$\sigma_m = F_m / A_0, \text{Н/мм}^2. \quad (24.21)$$

Если во время испытания наблюдается падение нагрузки, различают верхний $\sigma_{m.в}$ и нижний $\sigma_{m.н}$ пределы текучести.

Верхний предел текучести является наибольшим напряжением перед первым падением растягивающей нагрузки при увеличивающемся удлинении.

Нижний предел текучести является наименьшим напряжением, при котором возникает явление текучести. При этом не следует принимать во внимание колебания вследствие инерционности аппаратуры для измерения нагрузки.

Внезапное падение нагрузки на площадке текучести объясняют особенностями кинетики движения и размножения дислокаций в этих материалах.

При достижении верхнего предела текучести происходит отрыв отдельных дислокаций от блокирующих их чужеродных атомов (например, B , Si N в сталях). В начале пластической деформации незакрепленных – подвижных – дислокаций относительно немного, поэтому для того, чтобы образец растягивался со скоростью деформации, заданной перемещением захвата испытательной машины, они должны перемещаться с большой скоростью. Это обеспечивается интенсивным размножением дислокаций, требующим сравнительно высокого приложенного напряжения (зуб текучести).

Затем, при скачкообразном увеличении числа свободных дислокаций, они уже могут двигаться с заметно меньшей скоростью (но при этом их суммарное перемещение будет достаточным для обеспечения заданной машиной скорости деформации). Так как скорость движения дислокаций пропорциональна действующей растягивающей нагрузке, то происходит падение нагрузки до нижнего предела текучести. Последующий горизонтальный участок кривой $\sigma - \epsilon$, называемый площадкой текучести, характеризуется распространением полос скольжения (полос Людерса).

В полимерных материалах при удлинении $> 0,1 \dots 0,5$ % возникает скольжение цепей молекул. Для материалов типа пластомеров в вязком состоянии после снижения нагрузки, возможно, наблюдается текучесть вследствие вытягивания макромолекул. В этом случае также говорят о пределе текучести.

Возможно определение верхнего предела текучести $\sigma_{m.в}$ в качестве технической используемой характеристики, хотя она значительно сильнее, чем другие характеристики, определяемые при испытании на растяжение, зависит от усло-

вий эксперимента, в частности от формы образца и жесткости применяемых испытательных машин. Для материалов без четко выраженного предела текучести определяют условный предел текучести, который соответствует остаточной деформации 0,2 % ($\sigma_{0,2}$).

При превышении предела текучести напряжение повышается при одновременном увеличении деформации. Если способность к деформации образца исчерпана, наступает разрушение, которое может происходить (в зависимости от характера материала) или в области поднимающейся части кривой напряжение – деформация, или после превышения максимальной нагрузки. Самые высокие нагрузки F_{max} , определенные в обоих случаях и отнесенные к начальному поперечному сечению, называют временным сопротивлением при растяжении σ_B .

$$\sigma_B = F_{max} / A_0, \text{ Н/мм}^2. \quad (24.22)$$

Если разрушение происходит в понижающейся части кривой $\sigma - \epsilon$, можно определить другой показатель – условное сопротивление разрыву при растяжении

$$\sigma_R = F_R / A_0, \text{ Н/мм}^2. \quad (24.23)$$

Этот показатель применяют прежде всего для полимерных материалов; для металлов он представляет интерес только при фундаментальных металлофизических исследованиях. В качестве характеристики механических свойств качественных сталей часто приводят отношение предела текучести к временному сопротивлению σ_m / σ_B или $\sigma_{0,2} / \sigma_B$.

Кроме перечисленных характеристик прочности, при испытаниях на растяжение определяют также характеристики пластичности: относительное удлинение после разрыва δ и относительное сужение после разрыва δ_s , а также удельную работу деформации образца при испытании до разрушения W_s .

Под относительным удлинением после разрыва δ понимают отношение приращения расчетной длины образца после разрушения к начальной расчетной длине L_0

$$\delta = (L_B - L_0) 100 / L_0, \%, \quad (24.24)$$

где L_B – конечная расчетная длина образца после растяжения до разрыва.

Этот показатель состоит из равномерного и сосредоточенного удлинения. В то время как равномерное удлинение приводит к равномерному уменьшению поперечного сечения по всей расчетной длине, сосредоточенное удлинение, происходящее после превышения максимальной нагрузки, соответствует образованию шейки с существенно уменьшенным поперечным сечением в узко ограниченной области (рис. 24.7). На основе законов подобия Кика значения относительного удлинения после разрыва образцов с различным поперечным сечением сравнимы, если соотношение между расчетной длиной L_0 и поперечным сечением образца A_0 постоянно.

Исходя из этого, установлены размеры пропорциональных образцов, применяемых для испытаний металлических материалов. Относительное удлинение после разрыва длинного пропорционального образца ($L_0 = 10d_0$) обозначается δ_{10} , а для короткого пропорционального образца ($L_0 = 5d_0 - \delta_5$).



Рис. 24.7. Внешний вид образцов после растяжения с равномерным и сосредоточенным удлинением

Между обоими показателями имеет место соотношение

$$\delta_5 \approx (1,2 \dots 1,5) \delta_{10}. \quad (24.25)$$

При практическом определении относительного удлинения после разрыва не различают равномерной сосредоточенной деформации, а устанавливают более остаточное увеличение длины образца.

Чтобы определить абсолютное удлинение, необходимо на концы расчетной длины нанести метки, а после окончания испытания, разорванные части образца аккуратно сложить друг с другом и измерить расстояние между метками.

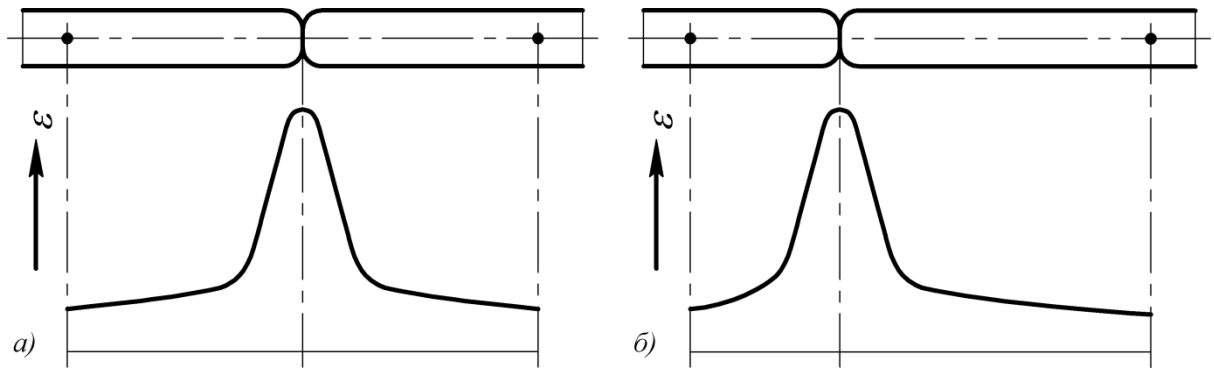


Рис. 24.8. Деформация образца, разорвавшегося в середине расчетной длины а) и вне ее б)

Правильные значения удлинения после разрыва получают только в том случае, если расстояние от места разрыва до ближайшей метки на коротких пропорциональных образцах составляет не менее $1/3$, а длинных – не менее $1/5$ расчетной длины.

Наиболее высокие значения удлинения получают при разрыве образцов посередине расчетной длины, так как в этом случае деформация обеих половин образца симметрична (рис. 24.8).

Для того чтобы определить относительное удлинение после разрыва образцов, разрушившихся вне указанных границ, применяют следующий способ.

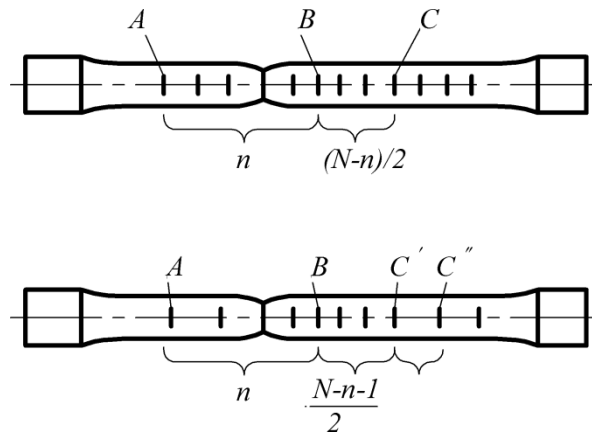


Рис. 24.9. Определение относительного удлинения после разрыва, происшедшего не посередине образца

На расчетную длину образца перед испытанием на равном расстоянии наносят N (чаще всего 10 или 20) делений (рис. 24.9). После испытания последнее деление на короткой части образца обозначают буквой A , а равноудаленное от места разрыва деление на длинной части образца – буквой B . Если n – число делений между A и B , то относительное удлинение после разрыва можно определить следующим образом:

а) $(N - n)$ – четное число:

$$\delta = (AB + 2BC - L_0) 100 / L_0; \quad (24.26)$$

б) $(N - n)$ – нечетное число:

$$\delta = (AB + BC' + BC'' - L_0) 100, L_0. \quad (24.27)$$

Для высокополимерных материалов подобное деление расчетной длины не применяют. При проведении испытания этих материалов часто используют направленно литые образцы, в которых уже при их изготовлении происходит ориентировка макромолекул. Это приводит к тому, что разрыв происходит на конце расчетной длины в месте, обычно определяемом технологией изготовления образцов.

Далее определяют для этих материалов сосредоточенное относительное удлинение после разрыва, соответствующее условному сопротивлению разрыва

$$\varepsilon_R = \Delta L_R \cdot 100 / L_0. \quad (24.28)$$

Для математически обоснованного описания испытаний на растяжение в настоящее время предлагают определять характеристику ε_R как деформацию разрушения также и для металлических материалов.

Во время испытаний происходит изменение поперечного сечения

$$q = (A_0 - A) \cdot 100 / A_0. \quad (24.29)$$

Относительное сужение (%) после разрыва образца

$$\psi = (A_0 - A_B) \cdot 100 / A_0, \quad (24.30)$$

где A_B – поперечное сечение в месте разрыва.

Для круглых образцов

$$\psi = [1 - (d_B/d_0)^2] \cdot 100, \quad (24.31)$$

а для образцов прямоугольного сечения (рис. 24.10)

$$\psi = (1 - a'b'/ab) \cdot 100. \quad (24.32)$$

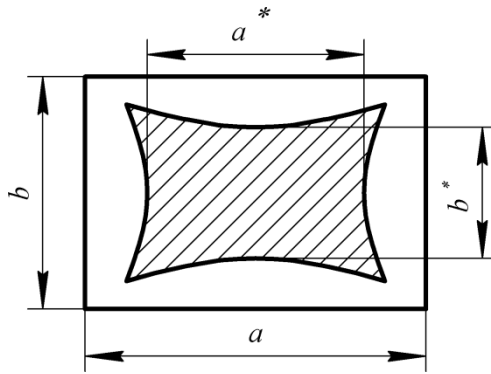


Рис. 24.10. Определение поперечного сечения в месте разрыва образца прямоугольного сечения после испытания на растяжение

По кривой напряжение – деформация можно также определить удельную работу изменения формы, совершаемую при деформации образца на испытательной машине

$$W_s = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\delta} \delta d\varepsilon, H \cdot мм / мм^3. \quad (24.33)$$

Значение W_s определяют или путем планиметрирования площади, ограниченной кривой «напряжение – деформация», или по величинам временного сопротивления при растяжении и относительного удлинения после разрыва с помощью соотношения

$$W_s = \xi \sigma_B \delta. \quad (24.34)$$

Сомножитель $\xi < 1$ называют коэффициентом полноты. При упругом нагружении получаем

$$W_{sel} = \frac{1}{2} \varepsilon_{el} \sigma_E, \quad (24.35)$$

а при $\varepsilon_{el} = \sigma_E / E$ соответственно

$$W_{sel} = \sigma_E^2 / 2E, H \cdot мм / мм^3. \quad (24.36)$$

Характеристики прочности, получаемые при испытании на растяжение, играют существенную роль при определении геометрических размеров статически нагруженных элементов несущих конструкций.

Модуль упругости определяет жесткость строительных сооружений и геометрическую устойчивость деталей машин и механизмов. Для предотвращения выхода их из строя вследствие пластической деформации или разрушения необходимо, чтобы действующие в конструкции напряжения были ниже предела текучести. Определение этой величины может также найти применение при выборе коэффициентов запаса, используемых в расчетах или эмпирических зависимостях в качестве меры уменьшения показателей предела текучести, временного сопротивления или условного сопротивления разрыву при растяжении, причем в существующей практике коэффициенты запаса прочности для разных материалов сильно различаются.

Характеристики пластичности при растяжении – относительное удлинение после разрыва, относительное сужение после разрыва и удельная работа деформации при испытании до разрушения – используют в качестве показателя определяющего в какой-то мере вероятность хрупкого разрушения, а также для оценки обрабатываемости материалов. Показатель $W_{S_{el}}$ имеет большое значение для определения геометрических размеров пружин.

24.1.3. Проведение испытаний, применяемые машины и приспособления

Для проведения испытаний на растяжение образец закрепляют в захватах испытательной машины и растягивают до разрыва, измеряя нагрузку и удлинение образца. Поэтому машины, предназначенные для испытаний на растяжение, устроены так, что расстояние от одного захвата до другого можно увеличивать, причем один из них непосредственно связан с динамометром, а другой – с движущейся траверсой. Удлинение измеряют или по движению траверсы, или с помощью соответствующего измерительного прибора прямо на образце. Принципиальное устройство подобных управляющих деформацией образца испытательных машин представлено на рис. 24.11.

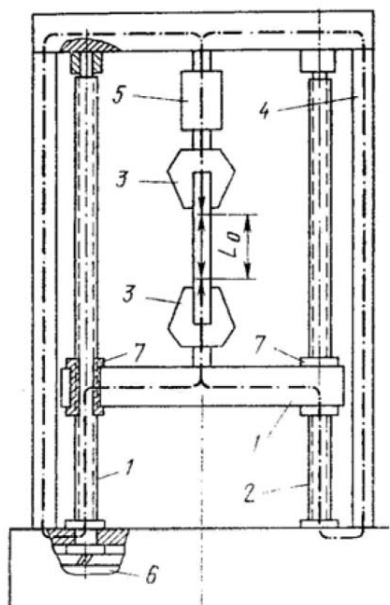


Рис. 24.11. Устройство испытательной машины на растяжение: 1 – траверса; 2 – шпindel; 3 – захваты; 4 – станина; 5 – силоизмерительное устройство; 6 – приводной механизм шпинделя; 7 – вращающаяся гайка для передвижения траверсы; L_0 – расчетная длина растягиваемого образца

Нагрузки, создаваемые приводом, передаются через траверсу на образец. Движение осуществляется по отношению к станине, воспринимающей действующие нагрузки. В возникающую при этом силовую цепь включен электронный силоизмеритель.

Для измерения удлинения служит индуктивный или емкостный датчик, который устанавливают непосредственно на испытываемом образце.

Запись диаграммы нагрузка – удлинение производят с помощью двухкоординатного самописца. Для создания нагрузки применяют системы с механическим или гидравлическим приводом. Обычно испытательные машины с максимальной нагрузкой менее $10^5 H$ имеют механический привод, а с максимальной нагрузкой более $10^5 H$ – гидравлический. В случае механического привода (рис. 24.11) движение траверсы 1 осуществляется от двух шпинделей, которые приводятся во вращение с помощью червячного колеса и червяка, или зубчатой передачи.

Перемещение траверсы обеспечивается вращающимися гайками 7, установленными в движущейся траверсе.

Между электромотором и шпиндельным механизмом встроена коробка передач, с помощью которой регулируют скорость перемещения траверсы и соответственно движущегося захвата.

Гидравлическое приводное устройство состоит из цилиндра, поршня и реверсивного вентиля. Для создания давления в цилиндре применяют регулируемый насос, работающий от электромотора. Путем соответствующей настройки этого насоса регулируют его производительность и отсюда скорость подачи поршня, который также связан с движущейся траверсой. Этот принцип устройства испытательной машины представлен на рис. 24.11.

Следует заметить, что в описанных выше управляющих деформацией испытательных машинах приблизительно равномерную скорость перемещения захвата и соответственно постоянную скорость деформирования образца можно получить только при использовании механического привода. В гидравлических машинах этого невозможно достичь без дополнительного регулятора.

Так как соотношения между напряжением и деформацией зависят от скорости, для гарантии воспроизводимости получаемых характеристик испытание на растяжение следует производить с постоянной скоростью.

Для упругой области достаточно поддерживать определенную скорость увеличения напряжения. При определении показателей σ_e и σ_m , для стали нельзя, например, превышать $10 \text{ Н/мм}^2 \cdot \text{с}$, что для области, в которой справедлив закон Гука, соответствует скорости деформации $0,005 \text{ \%}/\text{с}$. В пластической области скорость деформации зависит от испытываемого материала и условий испытания, которые определяются конструктивными особенностями привода, захватов, силоизмерителя, а также части образца за пределами расчетной длины. Так как при движении траверсы на расстояние S_m под действием нагрузки удлиняется не только образец S_m , но упруго деформируются пропорционально нагрузке все части машины S_m , то

$$S_m = S_p + S_M. \quad (24.37)$$

Такое же выражение можно записать для скоростей

$$V_m = V_p + V_M. \quad (24.38)$$

Расстояния или деформации относятся как скорости, поэтому для скорости деформации образца получим

$$V_p = S_p V_m / S_m \quad (24.39)$$

или

$$V_p = S_p V_m / (S_p + S_M). \quad (24.40)$$

При условии линейной зависимости между нагрузкой и деформацией вместо величин деформации можно ввести также податливость N (величину, обратную коэффициенту жесткости)

$$V_p = N_p V_m / (N_p + N_m). \quad (24.41)$$

Из уравнения (24.41), зная податливость машины и применяемые размеры образца, вычисляют необходимую скорость увеличения напряжения, чтобы получить в зоне текучести определенную скорость деформации.

В этом случае необходимо определить податливость испытательной машины для обычно используемой формы образцов, захватов и области применяемых нагрузок, а также дополнительно проверить зазоры.

При испытании стали податливость образца почти всегда отличается от податливости испытательной машины. Только при этом условии возможны точные исследования в области текучести. Фиксация появления площадки текучести, не зависящая от испытательной машины, возможна только в том случае, если последняя обнаруживает незначительную податливость (жесткие испытательные машины). Подобное требование может быть обеспечено конструктивно при создании машин с очень жесткой станиной, а также путем предварительного нагружения упругих элементов, встроженных в цепь с образцом. Жесткость мягких испытательных машин с большой податливостью можно увеличить ввинчиванием образца в цилиндр из материала с высоким пределом упругости и нагружать образец вместе с ним.

При соблюдении постоянной скорости деформации и непрерывном переходе от упругой к пластической области необходимо измерять деформацию электронным измерителем удлинения, установленным непосредственно на образце, и преобразовывать полученный сигнал в электрический для сравнения с заданным значением. Если значения не совпадают, скорость привода с помощью регулирующей системы испытательной машины изменяется, пока сигнал ошибки не станет равным нулю (скорость деформации снова соответствует заданному значению). Испытательные машины этого вида называют машинами с замкнутым контуром регулирования (рис. 21.12).

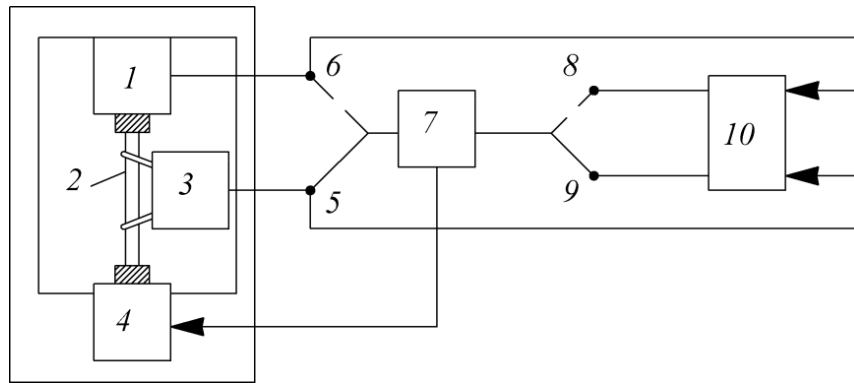


Рис. 24.12. Испытательные машины с замкнутым контуром регулирования: 1 – устройство для измерения силы; 2 – испытуемый образец; 3 – устройство для измерения длины; 4 – привод; 5 – фактическая величина σ ; 6 – фактическая величина ε ; 7 – сравнение; 8 – заданная величина σ ; 9 – заданная величина ε ; 10 – счетчик заданных величин σ и ε

24.1.4. Определение условного предела текучести

Для определения условных пределов упругости и текучести $\sigma_{0,2}$ необходимы точные измерения деформации. Классическим измерительным прибором является зеркальный прибор Мартенса.

Если величина предела упругости примерно известна, измерительный прибор устанавливают на образец и начальный отсчет берут при нагрузке, составляющей $\sim 90\%$ от нагрузки, которая соответствует ожидаемому пределу упругости. После повышения нагрузки ее поддерживают постоянной в течение 10 с, пока не стабилизируются показания измерителя деформации. Затем образец разгружают и измеряют остаточную деформацию.

Подобный процесс повторяют, повышая каждый раз напряжение от 100 до 200 Н/мм^2 до получения требуемой остаточной деформации.

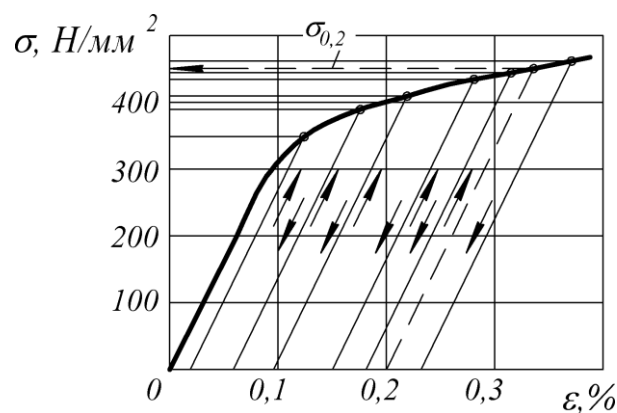


Рис. 24.13. Определение предела текучести $\sigma_{0,2}$ путем последовательного нагружения и разгрузки

Если величина предела упругости неизвестна, начало ступенчатого нагружения нужно установить следующим образом. Поскольку в упругой области одинаковым значениям прироста нагрузки всегда соответствует постоянное приращение общей деформации, превышение этого значения приращения свидетельствует о достижении области микропластичности. После достижения этой области начинают последовательно нагружать и разгружать образец.

Таким же образом, т.е. путем последовательного нагружения и разгружения, определяют условный предел текучести (рис. 24.13). Применяемые при этом измерительные приборы должны обеспечить определение приращения, составляющего 0,05 % от измеряемой длины, но не меньше 0,01 мм.

Для этого применяют механические тензометры со стрелочными индикаторами. Для проведения описанных испытаний с многократным разгрузением требуется много времени, поэтому на результаты измерений могут влиять процессы, протекающие в материалах (например, старение или ползучесть).

В связи с этим для определения условных пределов упругости и текучести целесообразно использовать новые методы. С помощью электронного измерителя деформации (рис. 24.14) можно определить условные пределы упругости и текучести как напряжения, соответствующие заданной величине деформации на записанной кривой (рис. 24.15).

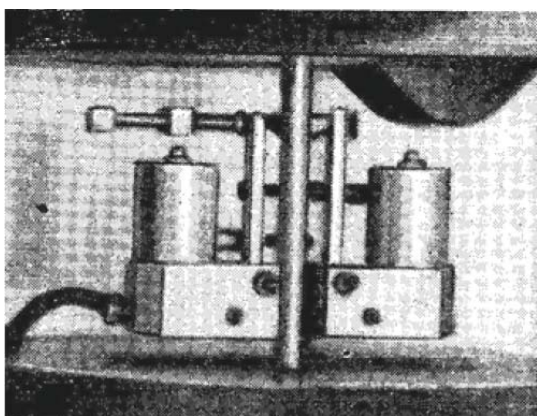


Рис. 21.14. Индуктивный прибор для измерения деформации (инженеры Холле, Магдебург)

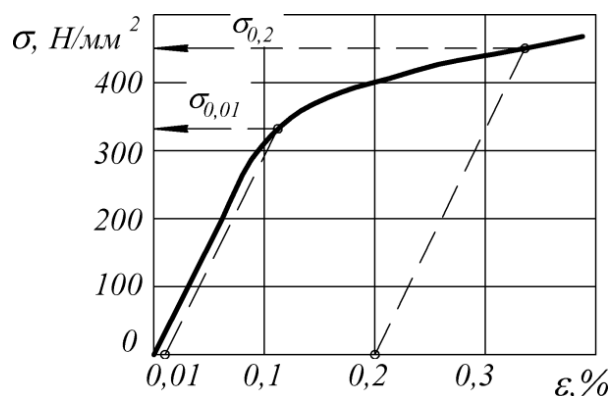


Рис. 24.15. Определение условных пределов упругости и текучести $\sigma_{0,01}$ и $\sigma_{0,2}$ по диаграмме напряжение – деформация при однократном нагружении

Для их определения проводят линию, параллельную прямой Гука при заданной величине допуска пластической деформации. Точка пересечения этой прямой с записанной при испытании кривой дает нагрузку, а после расчета –

напряжение, соответствующее условному пределу упругости или текучести. Для их определения по кривой нагрузка – удлинение при однократном нагружении, без промежуточных разгрузок, необходимо оборудовать применяемые испытательные машины регистрирующими измерителями нагрузки и удлинения.

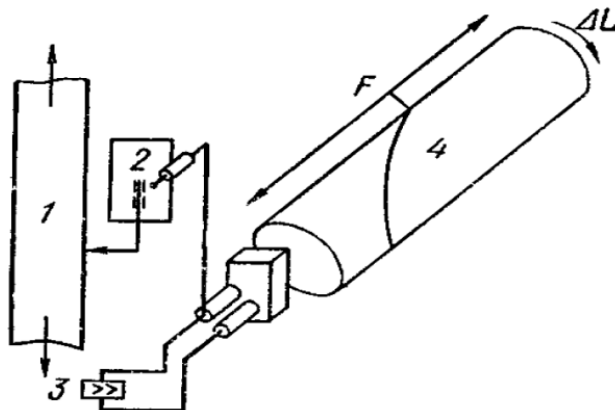


Рис. 24.16 – Схема регистрации нагрузки и деформации: 1 – растягиваемый образец; 2 – датчик деформации; 3 – усилитель; 4 – регистрирующий барабан; F – регистрация нагрузки; ΔL – регистрация удлинения

Более старые машины, не имеющие электронных измерителей нагрузки и деформации, можно дооборудовать регистрирующими приборами для измерения нагрузки и удлинения (рис. 24.16).

24.1.5. Изготовление образцов и их форма

Под образцом понимают часть заготовки, которая в необработанном или определенным образом обработанном состоянии подвергается испытанию.

Заготовкой называют часть полуфабриката или готового изделия, предназначенного для отбора образца с целью проведения испытания. При изготовлении образца из заготовки следует обращать внимание на то, чтобы не изменить свойства материала. Поэтому рекомендуется для обработки применять специальный режущий инструмент. Иногда для вырезки металлического образца можно применять кислородную резку или ножницы для резки листового материала, если предусмотрен припуск на последующую механическую обработку не менее 20 мм, чтобы удалить слои металла с измененными в результате такой резки свойствами.

Если поверхность образца шлифуют, следует обратить внимание на хорошее охлаждение, так как при шлифовке возможен местный нагрев, который может повлиять на свойства исследуемого материала.

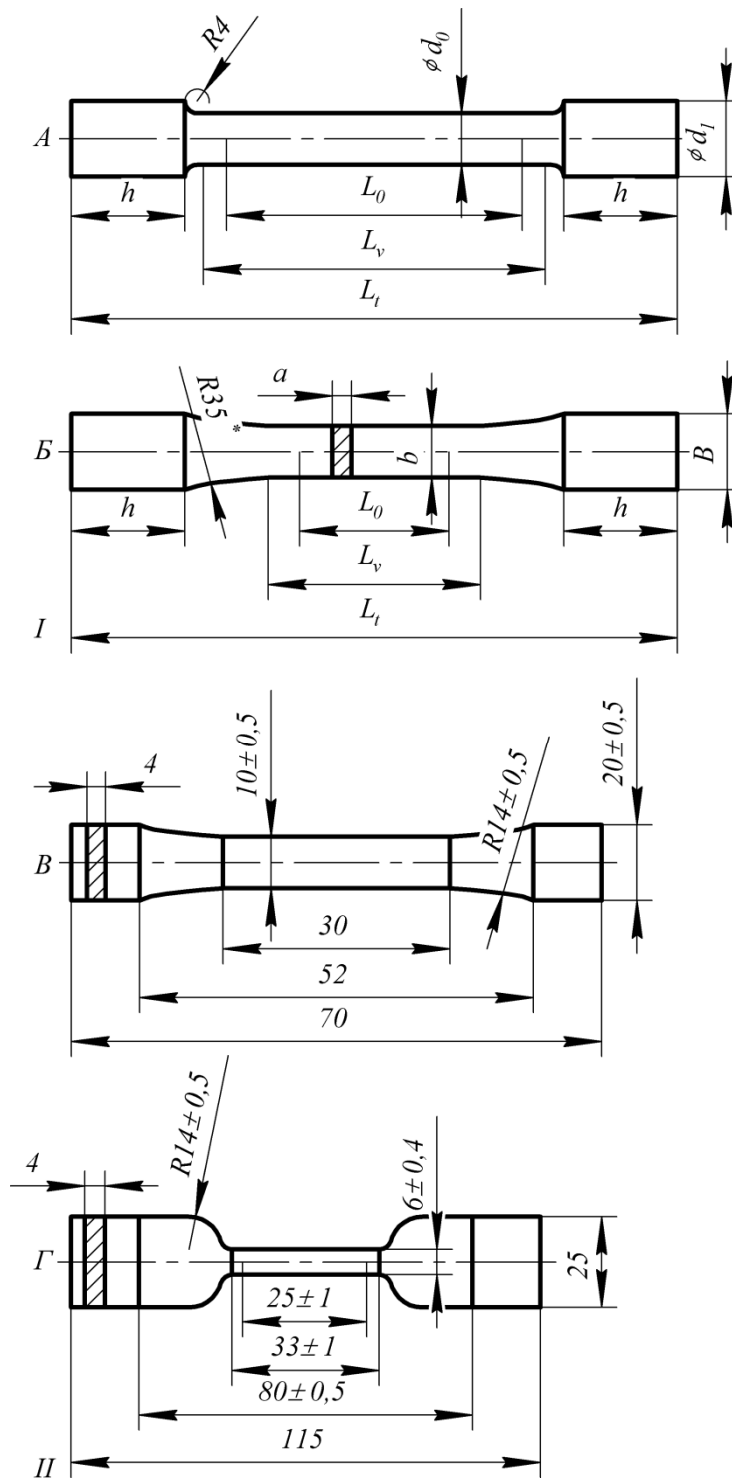


Рис. 24.17. Образцы для испытаний на растяжение: I – металлические материалы: А – цилиндрический образец с гладкой цилиндрической головкой; d_0 – диаметр образца; L_0 – расчетная длина образца; $d_1 \approx 1,2d_0$ – диаметр головки; $L_V = L_0 + d_0$ – длина образца, испытываемого на растяжение; L_t – общая длина; h – высота головки; Б – плоский образец с гладкой головкой: a – толщина образца; b – ширина образца; $B = 1,2b - 3$ мм – ширина головки; $h \approx 2b - 10$ мм – высота головки; II – полимерные материалы: Б; В и Г – образцы материала с небольшой и большой деформацией при разрушении соответственно

При отборе заготовок для образцов от поковок последние изготавливают с утолщением в заранее оговоренных местах, и образцы вырезают из этих мест. Место отбора образца должно быть по возможности так расположено на поковке, чтобы оно охватывало место, наиболее нагружаемое в последующей эксплуатации. В литье образец изготавливают из заготовки, поперечное сечение которой должно соответствовать среднему сечению литых деталей из этого материала.

При проведении испытаний на растяжение следует учитывать, как был вырезан образец – из изделия или заготовки. Во избежание путаницы образцы на торцевой поверхности следует клеймить.

Для испытаний на растяжение используют различные типы образцов (рис. 24.17). Образцы с гладкими головками (например, образец *A*) закрепляют в прижимных губках захватов испытательной машины. Для точных измерений деформации малыми допусками целесообразно применять образцы с резьбовыми головками или с заплечиками, чтобы гарантировать тугую посадку в захватах.

Образцы полимерных материалов изготавливают или выборкой из больших фасонных деталей, или непосредственным формообразованием при помощи прессования, литья под давлением и экструзии. При определении механических свойств, следует учитывать возможную анизотропию.

Для испытаний листов толщиной менее 5 мм применяют плоские образцы (образец *B*). Мелкие профили, трубы, штанги, фасонный и полосовой прокат можно испытывать необработанными. На концах тонких труб устанавливают заглушки.

Для испытания на растяжение полимерных материалов (типа пластомеров) применяют образцы с заплечиками, а для эластомеров – цилиндрические образцы.

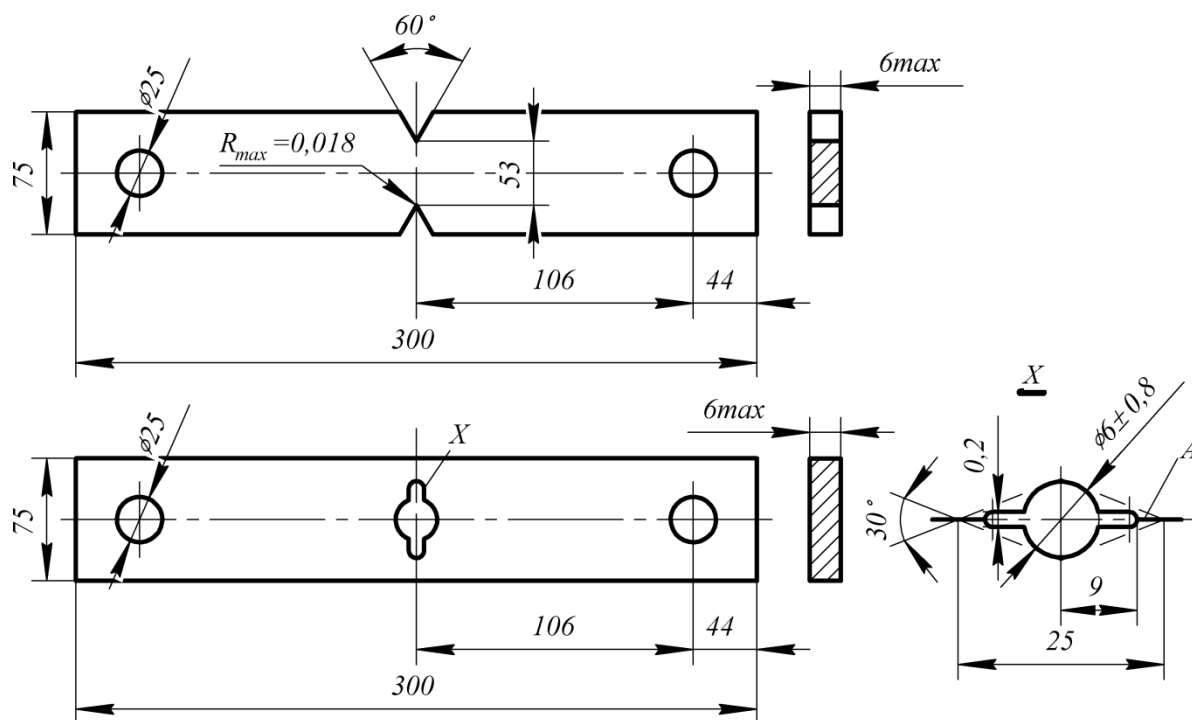


Рис. 24.18. Образцы для испытаний на растяжение с острым надрезом или наведенной усталостной трещиной: А – усталостная трещина

Для определения механических свойств материалов при объемном напряженном состоянии используют образцы с острым надрезом или с наведенной усталостной трещиной (рис. 24.18). Применение таких образцов особенно необходимо при проведении испытаний по методикам, разработанным в области механики разрушения.

Можно также подвергать испытаниям готовые элементы конструкций, такие как тросы, цепи или сварные и клепаные соединения. Для испытания корабельных цепей и канатов используют горизонтальные испытательные машины с длиной хода 7 м и растягивающей нагрузкой более 10^7 Н.

24.1.6. Испытание на растяжение при высоких и низких температурах

При температуре, отличной от комнатной, образцы в течение всего процесса испытания должны иметь требуемую температуру испытаний. Для горячих испытаний на растяжение применяют электрические нагревательные печи с воздушной атмосферой, в которых с помощью необходимой циркуляции воздуха поддерживают постоянную температуру с максимальным отклонением ± 2 °С. В определенных случаях надежны жидкие ванны с электрическим обогревом.

Для исследований при низких температурах применяют холодильные камеры, которые соединяются с холодильной машиной или с сосудом с жидким азотом.

При горячих испытаниях на растяжение для определения прочностных свойств образец нагревают до требуемой температуры и растягивают до достижения предела текучести, определенной степени пластической деформации или до разрыва. При этом определяют следующие характеристики: предел текучести $\sigma_{S/T}$; временное сопротивление $\sigma_{B/T}$; относительное сужение после разрыва ψ_T ; предел упругости $\sigma_{\epsilon bl/T}$ относительное удлинение после разрыва $\delta_{5/T}$ или $\sigma_{10/T}$ (T – температура испытания).

Следует иметь в виду, что величины свойств, полученные при горячих испытаниях, сильно зависят от скорости нагружения. На этом основании при определении физического или условного предела текучести устанавливают такую скорость нагружения, чтобы в каждый момент испытания увеличение деформации составляло бы 0,3 % расчетной длины в 1 мин или увеличение напряжения 300 Н/мм² в 1 мин. При этом исходят из того, что горячие испытания заканчиваются через определенное время, обычно через 20 мин. Так как это не всегда возможно, определяемые значения прочности представляют графически в зависимости от продолжительности опыта и интерполируют на выдержку 20 мин. Длину L_B и площадь наименьшего сечения измеряют на охлажденном образце.

На рис. 24.19 показано, как изменяются диаграммы растяжения строительной стали в зависимости от температуры испытания. Так как для этого материала при температуре выше 600 К большее значение приобретает фактор времени, для определения механических свойств при высоких температурах лучше применять длительные испытания.

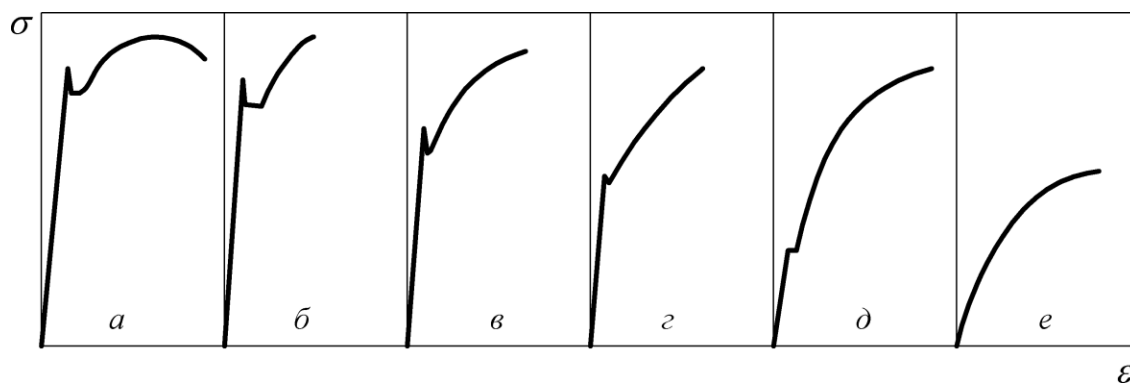


Рис. 24.19. Кривые напряжение – деформация для строительной стали при температуре К: а – 300; б – 400; в – 500; г – 600; д – 700; е – 800

На рис. 24.20 показано влияние низких температур на ход кривых напряжение – деформация для титана. Прерывистое скольжение, возникающее при температуре жидкого гелия, наблюдается у всех пластичных металлических материалов при их испытаниях на машинах с постоянной скоростью деформации.

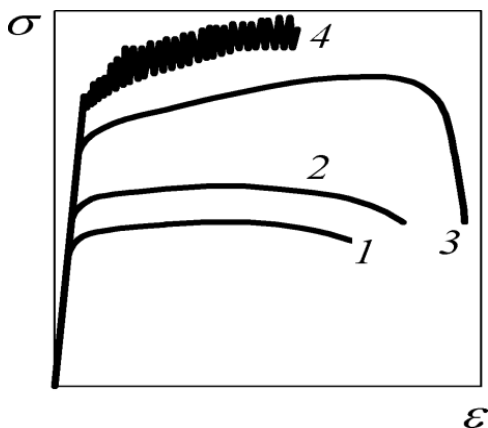


Рис. 24.20. Кривые напряжение – деформация для титана при температуре: 1 – 300; 2 – 200; 3 – 80; 4 – 4

24.2. Испытание на сжатие

Испытание на сжатие, при котором изучают поведение материалов при одноосном сжатии, можно рассматривать как обратное испытанию на растяжение. Оно имеет наибольшее значение для строительных материалов таких, как натуральный камень, кирпич, бетон, древесина и т.д.

Оно находит также применение для металлических и полимерных материалов, например для материалов, используемых в подшипниковой промышленности. При испытании на сжатие образец с поперечным сечением A_0 подвергают сжатию и измеряют при этом соответствующую нагрузку F . Для определения напряжения сжатия σ_d , нагрузку F относят к площади начального сечения A_0

$$\sigma_d = F / A_0, \text{ Н/мм}^2. \quad (24.44)$$

Если абсолютное укорочение при деформации $\Delta L_d = L_0 - L$ отнести к начальной высоте L_0 , получим относительное укорочение (%)

$$\varepsilon_d = \Delta L_d 100 / L_0. \quad (24.45)$$

Временное сопротивление при сжатии выражается формулой

$$\sigma_{dB} = F_B / A_0, \text{ Н/мм}^2, \quad (24.46)$$

где A_0 – начальное поперечное сечение образца и F_B – нагрузка, которую измеряют при появлении первой трещины или при разрушении.

Если трещина не образуется, испытание проводят до общего относительного сжатия 50 %. Тогда для временного сопротивления при сжатии получим

$$\sigma_{d_{50}} = F_{50} / A_0, \text{ Н / мм}^2. \quad (24.47)$$

При испытании дерева поперек волокна и других деформируемых строительных материалов испытания прекращают уже после достижения 10 % относительного укорочения.

Предел текучести при сжатии, соответствующий пределу текучести при растяжении, равен

$$\sigma_{dF} = F_F / A_0, \text{ Н/мм}^2 \quad (24.48)$$

где F_F – нагрузка, под действием которой на кривой напряжение – относительное укорочение при сжатии при одновременном появлении заметного остаточного укорочения появляется первое отклонение от прямолинейного хода.

Если кривая напряжение – относительное укорочение при сжатии монотонна, то в качестве предела текучести при сжатии определяют условный предел текучести. Условным пределом упругости считают условное напряжение, соответствующее относительному укорочению при сжатии 0,01 %.

После появления первой трещины соответствующее относительное укорочение при разрушении

$$\varepsilon_{dB} = \Delta L_{dB} 100 / L_0 \quad (24.49)$$

при

$$\Delta L_{dB} = L_0 - L_B. \quad (24.50)$$

Если образец при сжатии разрушается без видимой трещины, относительное укорочение при сжатии определить нельзя. Бочкообразную выпуклость образца (рис. 24.21), образующуюся при испытании на сжатие, нельзя сравнивать с соответствующим сужением при испытании на растяжение.

Бочкообразность при сжатии возникает из-за трения между опорными поверхностями на машине и поверхностями сжимаемого образца. Трение препятствует поперечной деформации на торцах сжимаемого образца нарушает одноосность напряженного состояния при сжатии. Так как ограничение деформации может распространяться конусообразно по середине образца, пластическая деформация при сжатии по существу ограничена областью, лежащей за пределами этого конуса.

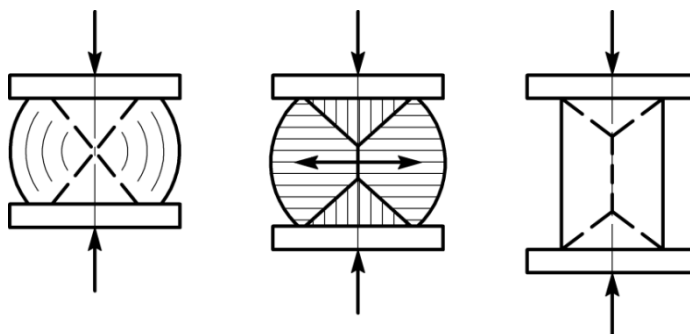


Рис. 24.21. Схема сжатия образца

Для испытания на сжатие применяют или те же испытательные машины, что и на растяжение, или специальные прессы (например, для испытаний строительных материалов). Находят применение механические прессы с механическим приводом при нагрузке до 105 Н и с гидравлическим приводом до 108 Н . Плиты, применяемые для передачи давления на образец, должны быть ровными, полированными и более твердыми, чем испытываемый материал. Плита, которую в начале испытания кладут на образец, должна быть установлена с помощью шарового вкладыша таким образом, чтобы она могла в некоторых пределах качаться во все стороны для выравнивания (рис. 24.22) перекосов и небольших отклонений поверхностей образца от параллельности. Диаметр цилиндрических образцов зависит от размеров имеющихся материалов и обычно составляет $10 - 30\text{ мм}$.

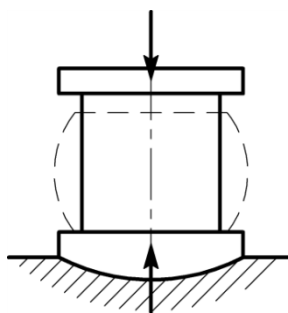


Рис. 24.22. Схема расположения образца при испытании на сжатие

Для грубых измерений используют нормальный образец с высотой, равной диаметру. При тонких измерениях следует применять длинные образцы с $L_0 = (2,5 \dots 3) d_0$. Более длинные образцы не применяют из-за опасности продольного изгиба.

При испытании длинных образцов расчетную длину выбирают на половину диаметра меньше, чем высота. Металлические образцы должны быть со всех сторон обточены или отшлифованы. Важно, чтобы торцы были точно параллельны и перпендикулярны оси образца. Для испытаний строительных материалов обычно используют образцы кубической формы.

Трубы и хрупкие материалы (гончарные изделия, глина) испытывают на сжатие для оценки их способности противостоять нагрузке в вертикальной плоскости (сплющиванию). При этом труба лежит на основной плите, а приложение нагрузки производят с помощью пуансона

24.3. Испытание на изгиб

Испытание на изгиб находит применение для исследования сравнительно хрупких материалов, например чугунов с пластинчатым графитом, инструментальной стали или керамики. Для вязких металлических материалов изгибающую нагрузку можно продолжать прикладывать за пределом текучести без разрушения материала.

Особенное значение имеет испытание на изгиб для полимерных материалов, так как для этой группы материалов, согласно их специфическим свойствам, при практическом использовании преобладает изгибающее напряжение.

При изгибе образца с симметричным поперечным сечением, как показано на рис. 24.23, в одной из наружных зон возникают растягивающие, а в противоположной – сжимающие напряжения. Напряжения увеличиваются по мере удаления в обе стороны от нейтральной оси, так что самые высокие их значения приходятся на наружные зоны. Если напряжения при этом достигают предела текучести, наступает пластическое течение.

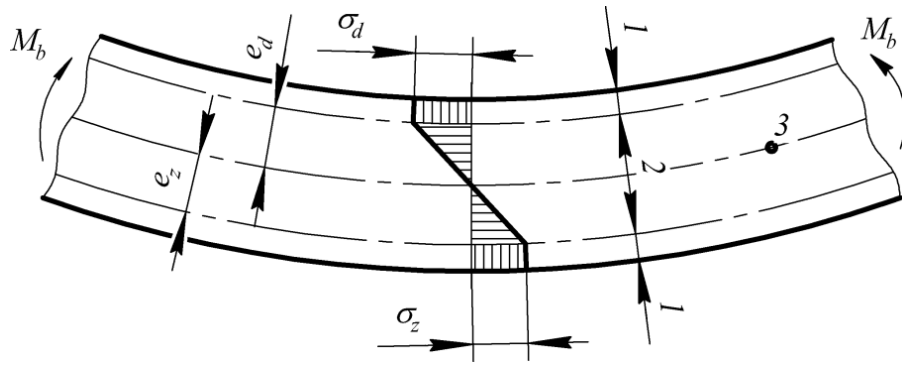


Рис. 24.23. Распределение напряжений в симметричном поперечном сечении при изгибе образца: 1 – пластическая деформация; 2 – упругая деформация; 3 – нейтральная ось

В упругой области напряжения в поперечном сечении образца распределяются по линейному закону и максимальное значение напряжений выражается как

$$\sigma_z = M_b e_z / I \text{ и } \sigma_d = M_b e_d / I, \quad (24.50)$$

где M_b – изгибающий момент; I – момент инерции относительно горизонтальной оси, или соответственно

$$\sigma_z = M_b / W_z \text{ и } \sigma_d = M_b / W_d, \quad (24.51)$$

где $W = I / e$ – момент сопротивления.

Характеристики прочности и пластичности при изгибе определяют при двух модификациях этого испытания: *трехточечном* и *четырёхточечном изгибе*. При трехточечном изгибе (рис. 24.24, а) наибольший изгибающий момент возникает под влиянием сосредоточенной силы F в середине образца

$$M_{b\max} = FL_s / 4, \quad (24.52)$$

где L_s – расстояние между опорами. При этом максимальное напряжение равно

$$\sigma_{\max} = FL_s / 4W, \text{ Н/мм}^2. \quad (24.53)$$

Введя F – нагрузку в момент разрушения, получим временное сопротивление при изгибе σ_{be} . В точке приложения нагрузки появляется наибольший упругий прогиб, равный

$$f = FL_s^3 / 48EI = \sigma_{\max} L_s^2 / 12EI, \text{ мм}, \quad (24.54)$$

Где E – модуль упругости.

Так как при испытании полимерных материалов разрушение образцов часто не достигается, определяют предельный прогиб при условии, что величина прогиба в точке приложения силы в 1,5 раза превышает толщину образца.

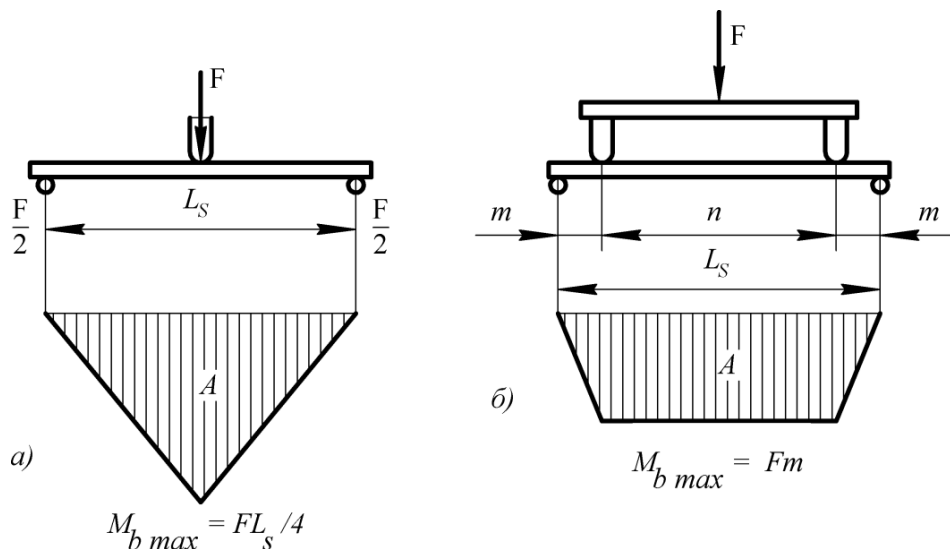


Рис. 24.24. Схема испытания и эпюра моментов A при трехточечном а) и при четырехточечном б) изгибе

Прочностной характеристикой, соответствующей этому прогибу, является условное временное сопротивление при изгибе $\sigma_{b1,5}$. В случае четко выраженного зуба (площадки) текучести определяют условный предел текучести при изгибе σ_{bF} . Если отнести абсолютную величину прогиба к расстоянию между опорами L_s , получим относительную стрелу прогиба при изгибе φ

$$\varphi = f 100 / L_s. \quad (24.55)$$

Кроме того, поведение материала можно охарактеризовать жесткостью, определяемой соотношением между прочностью при изгибе σ_{bB} и величиной стрелы прогиба при разрушении f_B .

При четырехточечном изгибе (рис. 24.24) действующая на образец нагрузка F приложена в двух местах на расстоянии m от опор. При таком нагружении между точками приложения нагрузки не возникает усилий среза. Изгибающий момент между точками приложения нагрузки постоянен, т.е.

$$M_{b\max} = Fm. \quad (24.56)$$

Максимальные напряжения между точками приложения нагрузки равны

$$\Sigma_{\max} = Fm / W, \text{ Н/мм}^2. \quad (24.57)$$

Наибольший прогиб в середине между точками приложения нагрузки при четырехточечном изгибе относительно линии опор выражается как

$$f_{\max} = Fm(3L_s^2 - 4m^2) / 14EI. \quad (24.58)$$

В отличие от трехточечного при четырехточечном изгибе вследствие постоянства изгибающего момента между точками приложения нагрузки создаются условия, при которых получаемые результаты испытаний правильно характеризуют материал и не зависят от возможных неоднородностей образца (в частности, структурных) в области максимального изгибающего момента.

Для проведения испытания на изгиб применяют цилиндрические или призматические образцы.

Образцы кладут на гладкие цилиндрические опоры и равномерно нагружают в соответствии с выбранной схемой испытаний с помощью одного или двух пуансонов.

Перед началом испытания точно устанавливают расстояние между опорами (для цилиндрических образцов $L_s = 20d_0$).

24.4. Испытание на кручение

Испытание на кручение (или на скручивание) имеет второстепенное значение. Оно введено для оценки материалов валов или проволоки, а также для определения прочности и пластичности твердых сталей.

При проведении испытания на кручение один конец образца закрепляют неподвижно, а к другому концу прикладывают пару сил в плоскости, перпендикулярной к оси образца, так что возникает крутящий момент, равный

$$M_t = Fd, \quad (24.59)$$

где F – действующая сила; d – диаметр образца.

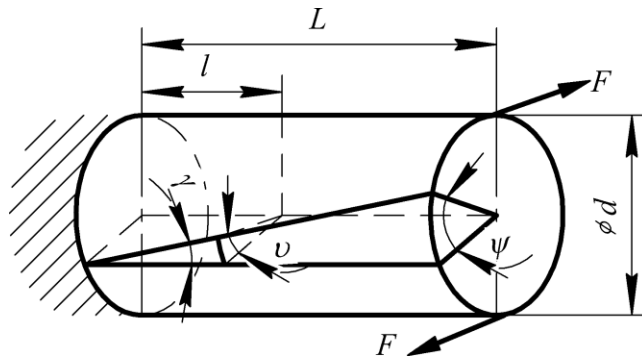


Рис. 24.25. Схема испытаний на кручение

При кручении все поперечные сечения образца сдвигаются (поворачиваются) вокруг общей оси по отношению к закрепленному сечению (рис. 24.25). Этот сдвиг увеличивается с увеличением расстояния от места закрепления, причем линии, параллельные оси образца, переходят в винтовые.

Сдвиг, происходящий в двух соседних поперечных сечениях, определяется углом кручения ψ и пропорционален расстоянию L между этими плоскостями. Под углом относительного поворота ν понимают угол кручения двух сечений, находящихся на расстоянии l (рис. 24.25). Условный угол сдвига γ представляет собой угол, образующий соответствующую винтовую линию с образующей цилиндра. В упругой области условный угол сдвига пропорционален удаленности от оси образца. Отношение между условным углом сдвига γ и соответствующим касательным напряжением при сдвиге τ обозначается коэффициентом упругости сдвиге β

$$\beta = \gamma / \tau. \quad (24.60)$$

Обратная величина этого коэффициента является модулем сдвига.

Как при испытании на изгиб, так и при испытании на кручение наибольшее напряжение возникает в поверхностных зонах, где

$$\tau_{\max} = M_t / W_p. \quad (24.61)$$

Для образцов с круглым поперечным сечением

$$\tau_{\max} = 16M_t / \pi d^3. \quad (24.62)$$

Для того чтобы определить угол сдвига, измеряют взаимное скручивание двух поперечных сечений. Так как $\nu = 2\gamma d$ и $\varphi = \nu L$, то между углом сдвига и

углом скручивания φ для двух поверхностей на расстоянии L справедливо соотношение

$$\varphi = 2\gamma L / d. \quad (24.63)$$

В соответствии с законом Гука для касательного напряжения при сдвиге

$$\tau = G\gamma \quad (24.64)$$

получим

$$\varphi = 2\tau L / Gd \quad (24.65)$$

или

$$\varphi = 32M_t L / \pi d^4. \quad (24.66)$$

Модуль сдвига при этом можно определить из соотношения

$$G = 32M_t L / \pi d^4 \varphi. \quad (24.67)$$

Остаточная деформация для пределов упругости и текучести при кручении вдвое больше, чем при растяжении, так что $\sigma_{0,01}$ соответствует пределу упругости $\tau_{0,02}$, а $\sigma_{0,2}$ – пределу текучести $\tau_{0,024}$. После достижения временного сопротивления при кручении τ_{tB} происходит разрушение либо в плоскости поперечного сечения, либо с образованием расслоений в продольном направлении.

В хрупких материалах плоскость разрушения соответствует плоскостям, по которым действуют наибольшие нормальные напряжения. Так как эти плоскости составляют угол 45° с осью образца, то излом представляет собой винтовую поверхность.

Самым простым способом измерения угла закручивания является измерение взаимного поворота двух зажатых головок образца. Для определения угла закручивания в момент разрушения можно на его поверхности нанести линию, параллельную оси образца, и измерить изменение ее при соединении обеих половинок образца после разрушения.

Для проведения испытания на кручение применяют в первую очередь цилиндрические образцы. Расчетная длина чаще всего составляет $10d$. Безопасного закрепления достигают с помощью клина, самотормозящегося с увеличением крутящего момента.

24.5. Испытание на срез

При испытании на срез образец нагружают двумя силами F , которые действуют в одной плоскости. Фактически возникает пара сил с плечом a (рис. 24.26), т.е. при этих испытаниях возникают дополнительные изгибающие напряжения.

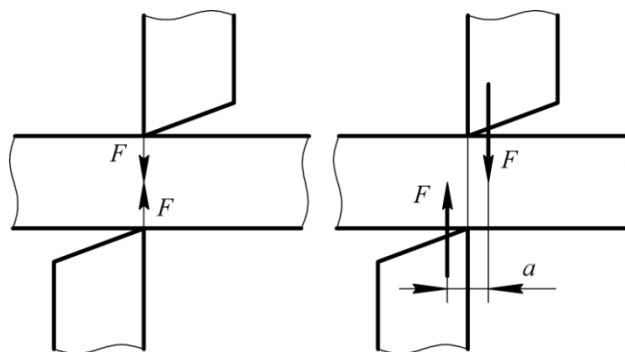


Рис. 24.26. Силы, действующие при испытании на срез

На практике чаще всего проводят испытание на двойной срез.

На рис. 24.27 представлены схемы устройства для испытания на двойной срез при растяжении и сжатии.

Так как при испытании на срез не достигают определенного напряженного состояния, устанавливают только максимальную силу F_{\max} , необходимую для среза, исходя из которой рассчитывают при идеализированном условии равномерного напряжения поперечного сечения сопротивление срезу при испытании на двойной срез

$$\tau_s = F_{\max} / 2A_0 = 2F_{\max} / \pi d^2, \text{ Н/мм}^2. \quad (21.68)$$

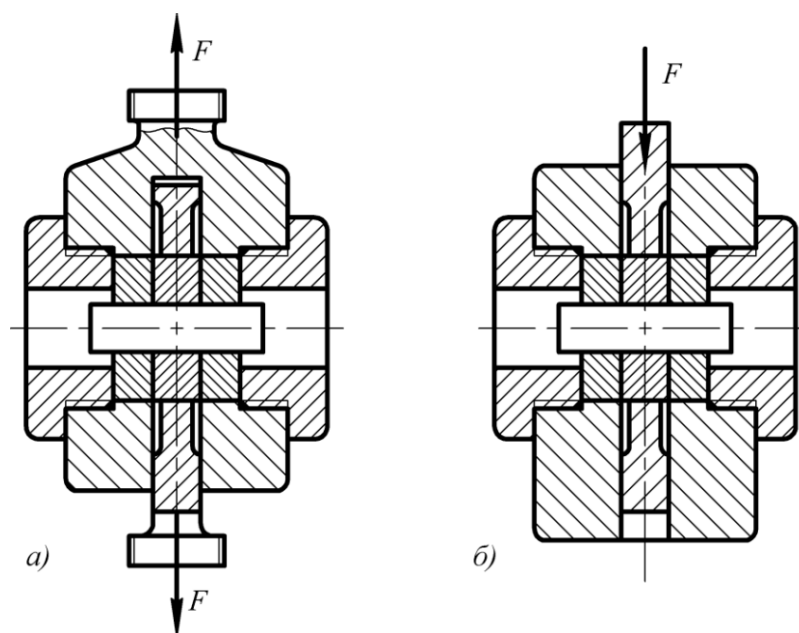


Рис. 24.27. Схема испытания на срез: а – при растяжении; б – при сжатии

Испытание на срез имеет практическое значение при оценке сталей для заклепок или, например, для определения размеров ножниц.

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите классификацию механических испытаний?
2. Какие параметры и величины измеряются при проведении механических испытаний?
3. Какое оборудование применяется при проведении испытаний на разрыв?
4. Как проводятся испытания на срез?
5. Какие параметры измеряются при проведении испытаний на сжатие?
6. Какие параметры измеряются при проведении испытаний на кручение?

25. ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

25.1. 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.

25.1.1. Испытания на длительную прочность

При длительных испытаниях деформация образца происходит не за счет управляемого перемещения одного из захватов (траверсы) испытательной ма-

шины, 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 $\varepsilon_{R(t)}$ в определенный момент после разгрузки образца, например остаточную деформацию через 1 мин – $\varepsilon_{1\text{мин}}$.

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.

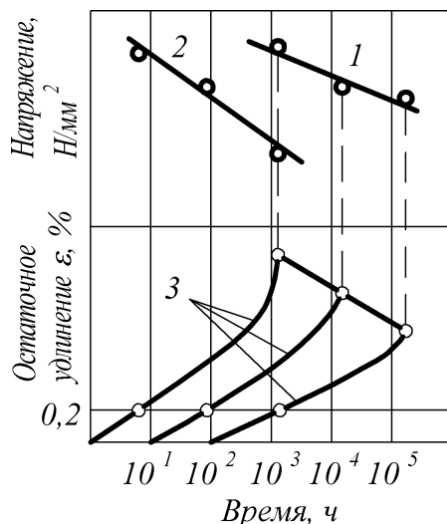


Рис. 25.1 – Построение диаграммы длительных статических испытаний: 1 – линии разрушающих напряжений; 2 – линия напряжений, вызывающих удлинение $\varepsilon_{\text{ыт}} = 0,2\%$; 3 – кривые зависимости деформации от времени при различных нагрузках

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. 25.1). Так получают временные зависимости разрушающих напряжений и напряжений, вызывающих остаточную деформацию 0,2 % (верхняя часть рис. 25.1).

С помощью диаграмм длительных статических испытаний определяют предел ползучести и предел ограниченной длительной прочности путем интерполи или экстраполяции.

Экстраполяцию по времени можно проводить, как правило, в пределах одного порядка; значения относительного удлинения и сужения после разрушения при длительных испытаниях не экстраполируют.

На рис. 25.2 представлены временные зависимости разрушающих напряжений для различных полимерных материалов при комнатной температуре в интервале $10^{-2} \dots 10^4$ ч.

На рис. 25.3 показано влияние температуры на поведение специального сорта полиэтилена при длительном нагружении. Видно, что линии разрушения при длительных выдержках имеют излом при тем более низких напряжениях, чем выше температура испытания. На поведение полимерных материалов при длительном нагружении, кроме того, сильно влияют условия обработки, а также окружающая среда.

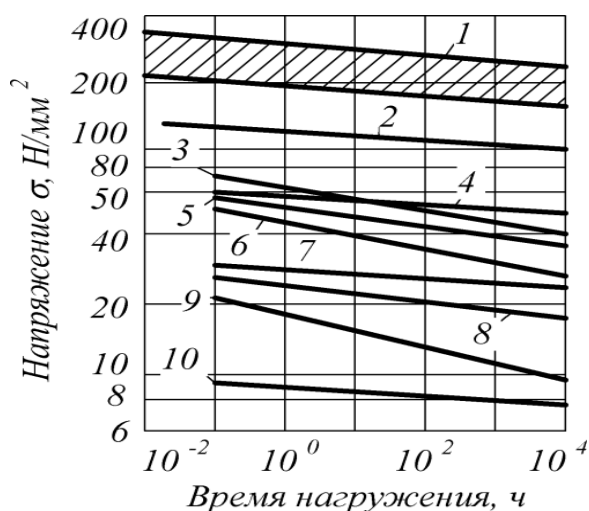


Рис. 25.2. Зависимость разрушающих напряжений от времени для различных полимерных материалов: 1 – GF-UP (упрочненный тканью); 2 – GF-UP (упрочненный волокном); 3 – PMMA; 4 – PC; 5 – PUC; 6 – PS (вязкий); 7 – PS (вязкий); 8 – PP; 9 – PE (HD); 10 – PE (ND)

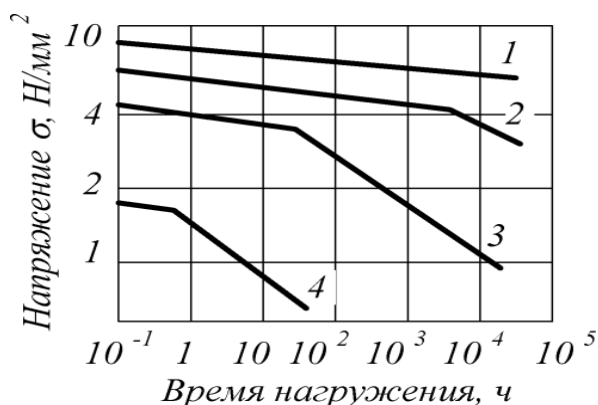


Рис. 25.3. Зависимость разрушающих напряжений полиэтилена от времени при температуре К: 1 – 290; 2 – 310; 3 – 330; 4 – 350

25.1.2. Испытания на ползучесть

В случае длительных испытаний при снижающемся (за счет перехода части упругой деформации в пластическую) напряжении образец при определенной температуре подвергают начальной деформации и измеряют постепенное уменьшение напряжения (релаксацию).

При этом получают следующие характеристики:

- скорость релаксации напряжений – скорость, с которой уменьшаются напряжения в образце;
- сопротивление релаксации напряжений, которое устанавливают при определенной температуре и начальной деформации по истечении определенного времени. Сопротивление релаксации обозначают σ с индексом $E/\text{время}, \epsilon$ (начальная деформация, %).

Например, сопротивление релаксации после 24 ч испытаний при начальной деформации 0,3 % следует записать $\sigma_{E/24(0,3)}, \text{Н/мм}^2$.

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.

25.2. Испытания на циклические нагрузки

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. 25.4 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.

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, ко-

торые, 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.

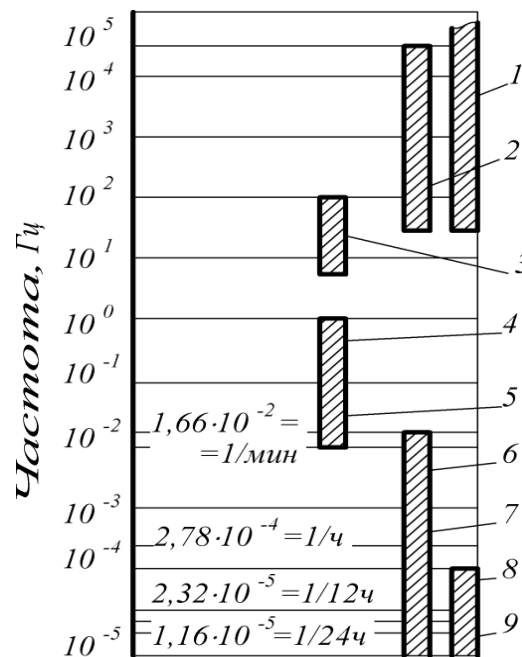


Рис. 25.4. Области частот колебаний циклических нагрузок: 1 – резонансные колебания; 2 – звуковые колебания; 3 – колебания нагрузок, действующих на детали автомобилей из-за неровности дороги; 4 – колебания при движении корабля; 5 – колебания при полете самолета; 6 – колебания нагрузок, возникающих при движении различных транспортных средств и в резервуарах; 7 – колебание ветровой нагрузки, действующей на строительные сооружения; 8 – температурные колебания; 9 – колебания снеговой нагрузки.

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 об-

ласть механики твердого тела, занимающаяся усталостной прочностью и эксплуатационной стойкостью.

25.2.1. 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.

Зарождение трещин. Во время циклического нагружения кристаллиты в поликристаллах постоянно подвергаются действию переменных напряжений. Эти напряжения будут вызывать переменное движение дислокаций в тех кристаллитах, 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.

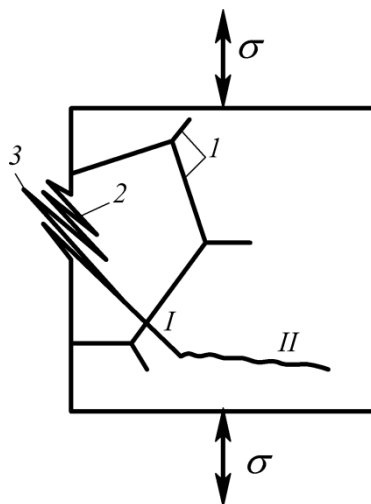


Рис. 25.5. Возникновение и распространение усталостной трещины на стадиях I и II: 1 – граница зерна; 2 – интрузия; 3 – экструзия

В этих полосах скольжения протекание дислокационных реакций приводит к образованию дискообразных выдавливаний (экструзий) и углублений (интрузий)

зий), которые рассматривают как первую стадию образования субмикроскопической трещины (рис. 25.5). 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 гранцентрированной и объемноцентрированной 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.

Развитие трещин. При увеличении продолжительности циклического нагружения интрузии сначала растут в направлении максимальных касательных напряжений, т.е. распространяются в виде микротрещин в отдельных кристаллах 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 (надрезов, 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 транскристаллитной усталостной трещины. Оно становится перпендикулярным к направлению действия максимальных нормальных напряжений.

В некоторых материалах, например в высокопрочных алюминиевых сплавах, стальных отливках и в чугунах с шаровидным графитом, наблюдается интراكристаллитное распространение трещин. Чаще всего механизм распространения трещин на II стадии характеризуется постепенным дискретным ее

продвижением при чередовании затупления и заострения вершины трещины (рис. 25.6).

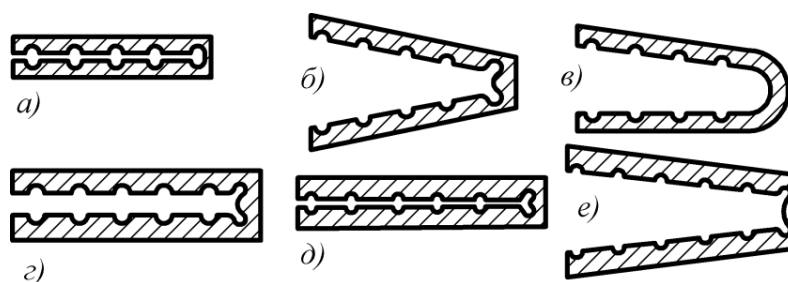


Рис. 25.6. Постепенный рост трещины при циклическом нагружении: а – в ненагруженном состоянии; б – увеличение растягивающих напряжений; в – максимальные растягивающие напряжения; г – увеличение сжимающих напряжений; д – максимальные сжимающие напряжения; е – увеличение растягивающих напряжений

При циклическом нагружении периодически создаются новые поверхностные трещины, что видно на поверхности излома в виде образующихся усталостных полос или бороздок (рис. 25.7).

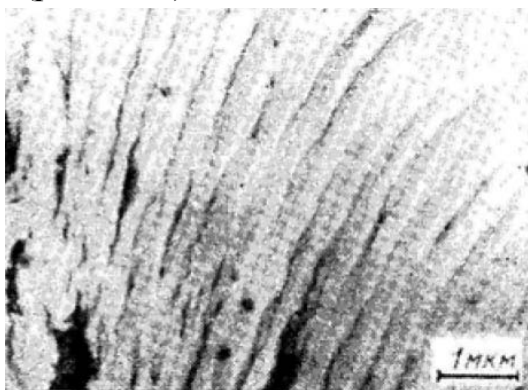


Рис. 25.7. Образование усталостных борозд на поверхности излома строительной стали на II стадии распространения трещины

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 повышения нагрузки невозможно. Это явление объясняет образование нераспространяющихся трещин.

Для количественной оценки скорости распространения трещины на II стадии вначале определяли ее зависимость от длины трещины a , напряжения σ и свойств материала M :

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

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

$$da/dN = c \Delta K^m, \quad (25.1)$$

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

На рис. 25.8 графически представлена взаимосвязь между da/dN и ΔK . Влияние микроструктуры оказывается самым сильным в области A и C , в то время как внешние условия нагружения прежде всего влияют в области A и B .

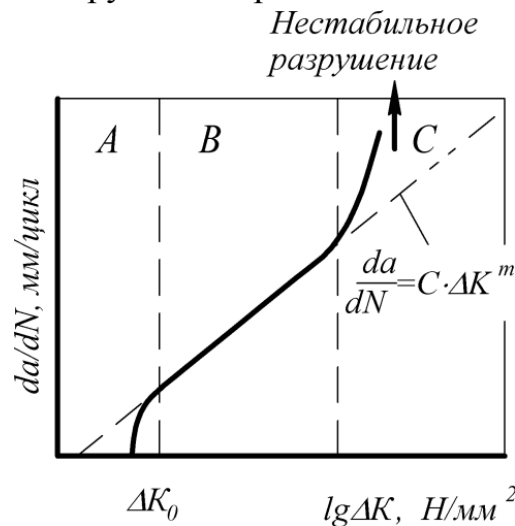


Рис. 25.8. Кривая роста усталостной трещины (схема): A – рост трещины при $\Delta K > \Delta K_0$; при $\Delta K < \Delta K_0$ трещина не распространяется; B – непрерывный рост трещины с образованием бороздок; C – приближение к статическому разрушению da/dN , мм/цикл

Различный наклон прямых для разных материалов в области B , 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 (25.1) можно расширить с помощью уравнения

$$da/dN = c [(0,5 - 0,4R) \Delta K]^m, \quad (25.2)$$

где $R = K_{\min} / K_{\max}$ – отношение минимального и максимального коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещины, возникающих во время циклического нагружения. Интегрированием уравнений (25.1) или (25.2) можно определить число циклов до разрушения и рассчитать срок службы циклически нагружаемой детали.

При упругопластической 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 малоцикловой или кратковременной усталости, так как уже $10^1 \dots 10^4$ циклов могут привести к разрушению. Рост трещины в этом случае описывается выражением Мансона–Коффина

$$N_B^n \varepsilon_p = c, \quad (25.3)$$

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

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

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. 25.9). 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;

- зону долома при последних циклах нагружения с шероховатой и испещренной трещинами поверхностью.

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.

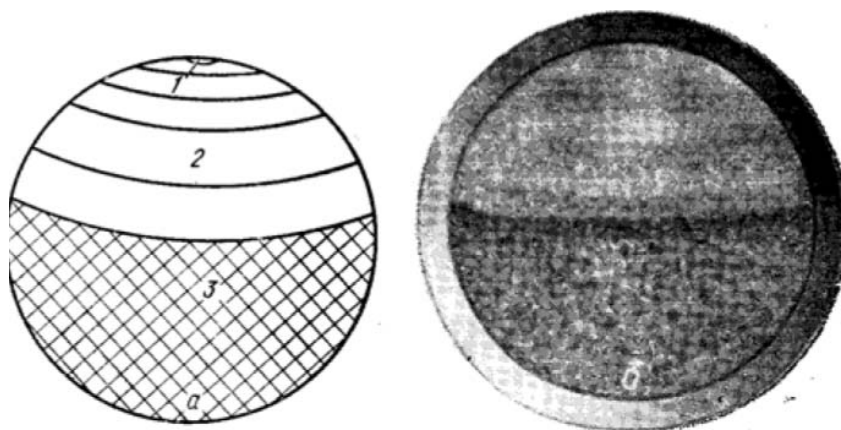


Рис. 25.9. Усталостный излом: а – схема макроскопического излома; б – одноочаговый усталостный излом; 1 – фокус излома; 2 – область постепенного распространения трещины с линиями усталости; 3 – зона долома

Вид нагружения	Высокие номинальные напряжения		Низкие номинальные напряжения	
	Гладкий образец	Надрезанный образец	Гладкий образец	Надрезанный образец
Растяжение				
Односторонний изгиб				
Двусторонний изгиб				

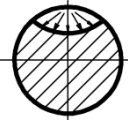
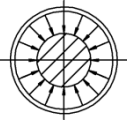

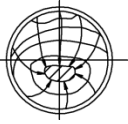
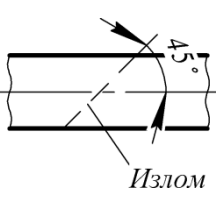
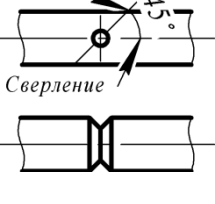
Круговой изгиб				
Кручение			То же, что при высоких номинальных напряжениях	

Рис. 25.10. Форма усталостных трещин при различных видах нагружения

На рис. 25.10 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. 25.7.

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 циклически нагружаемых деталей отрицательно влияют концентраторы напряжений технологического происхождения (подрезы, коррозионные язвы, дефекты сварки, закатанные плены), а также чистота обработки поверхности (шероховатость).

На рис. 25.11 показано влияние различной обработки поверхностей на долговечность сталей в зависимости от прочности на растяжение.

С другой стороны, с помощью некоторых процессов поверхностной обработки можно существенно повысить срок службы изделия. Особенно благоприятны поверхностная холодная пластическая деформация, накатка или дробеструйная обработка, а также поверхностная химико-термическая обработка – цементация или азотирование. Положительное влияние этих процессов связано с образованием на поверхности остаточных напряжений сжатия.

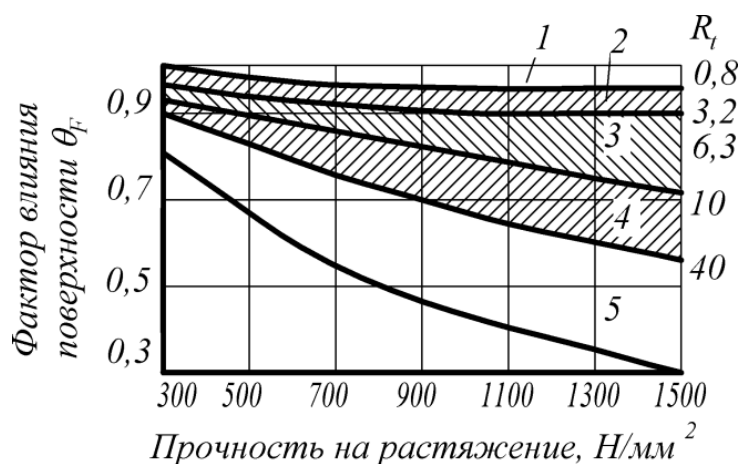


Рис. 25.11. Влияние обработки поверхности на долговечность сталей различной прочности: 1 – полировка; 2 – шлифовка; 3 – механическая обработка резцом; 4 – черновая обдирка; 5 – окисленная поверхность после прокатки; R_t – величина дефектов поверхности вершине

Влияние окружающей среды. Окружающая среда, находящаяся в контакте с поверхностью трещины, влияет на рост трещины вследствие физико-химических 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.

25.2.2. 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 программированном нагружении.

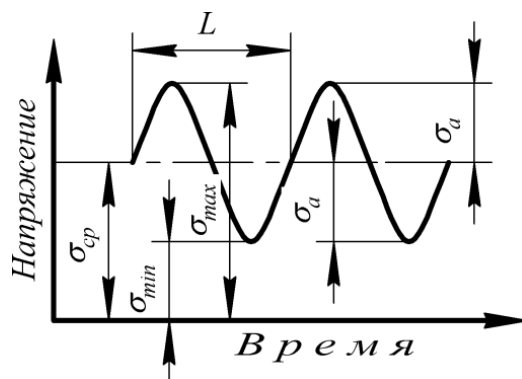


Рис. 25.12. Изменение напряжений во времени при регулярном циклическом нагружении

Циклические испытания при регулярном нагружении. Испытания на усталость при регулярном нагружении, или испытания по Велеру, проводят при синусоидальном циклическом нагружении. Процесс нагружения характеризуют следующие показатели (рис. 25.12): среднее напряжение σ_{cp} , амплитуда напряжения σ_a , максимальное напряжение σ_{max} , минимальное напряжение σ_{min} , размах напряжения $2\sigma_a$.

Полный цикл изменения напряжения называют циклом нагружения L .

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

$$\sigma_{cp} = 0,5 (\sigma_{max} + \sigma_{min}); \quad (25.3)$$

$$\sigma_a = \pm 0,5 (\sigma_{max} - \sigma_{min}). \quad (25.4)$$

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.

В зависимости от указанных характеристик усталостные испытания при регулярном нагружении можно проводить при трех режимах, охватывающих семь разновидностей циклов напряжений (рис. 25.13). Испытания можно проводить в условиях действия:

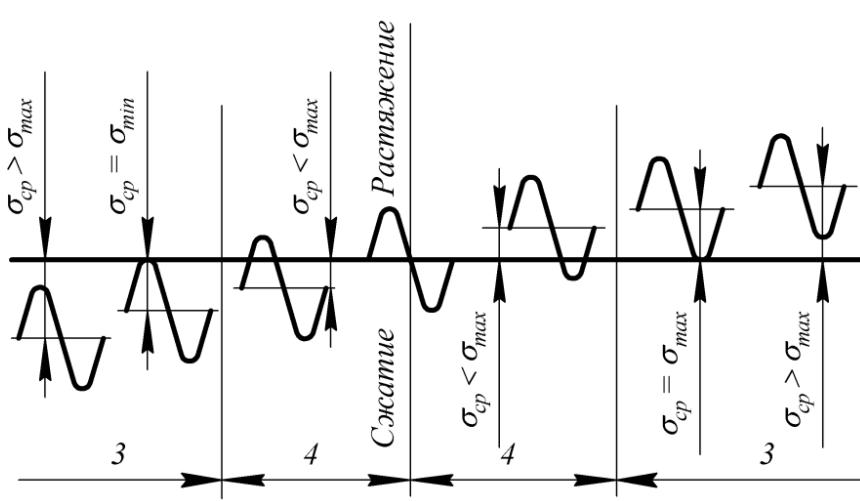


Рис. 25.13 – Виды регулярного циклического нагружения: 1 – сжатие; 2 – растяжение; 3 – область действия знакопостоянного нагружения; 4 – область действия

- 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. 25.14.

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} .

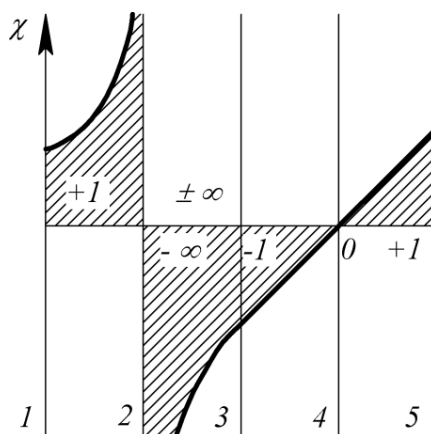


Рис. 25.14. Изменение коэффициента асимметрии цикла при различных режимах нагружения: 1 – статическое сжатие; 2 – от нулевой цикл напряжений при сжатии; 3 – симметричный цикл напряжений; 4 – от нулевой цикл напряжений при растяжении; 5 – статическое растяжение

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

$$\sigma_{OD} = \sigma_{cp} + \sigma_{AD}. \quad (25.5)$$

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

$$\sigma_M = \sigma_{\max} - \sigma_{AD}. \quad (25.6)$$

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

$$\sigma_{\omega} = \sigma_A = \sigma_{\max} = \sigma_{\min}; \quad (25.7)$$

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

$$\sigma_{пл} = 2\sigma_A. \quad (25.8)$$

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.

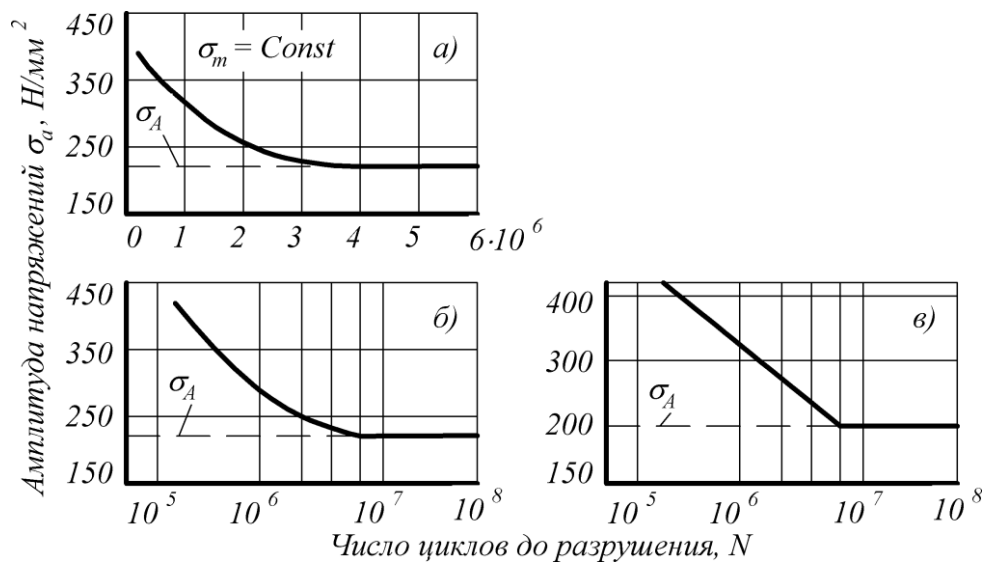


Рис. 25.15. Зависимость амплитуды напряжений σ_a и числа циклов до разрушения N (кривая Велера) в системах координат: а – линейной; б – полулогарифмической; в – двойной логарифмической

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. 25.15). 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. 25.13, 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.

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 $\sigma(N)$

$$\sigma(N) = \sigma_{cp} \pm \sigma_A. \quad (25.9)$$

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 106 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

$$\sigma = [\sigma_B + \sigma_D f(N)] / [1 - f(N)], \quad (25.10)$$

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

$$P_a = 100m / (n + 1), \%. \quad (25.11)$$

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 соот-

ветственно. По результатам испытаний определяют среднее значение предела выносливости

$$\sigma_D = \sigma_x + d (A/F \pm 0,5), \quad (25.12)$$

где σ_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:

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

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

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

$$s = 1,62d \left(\frac{FB - A^2}{F^2} + 0,029 \right), \quad (25.13)$$

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.

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. 25.16) по оси абсцисс отложено среднее напряжение, а на оси ординат в том же масштабе – максимальное или минимальное напряжение.

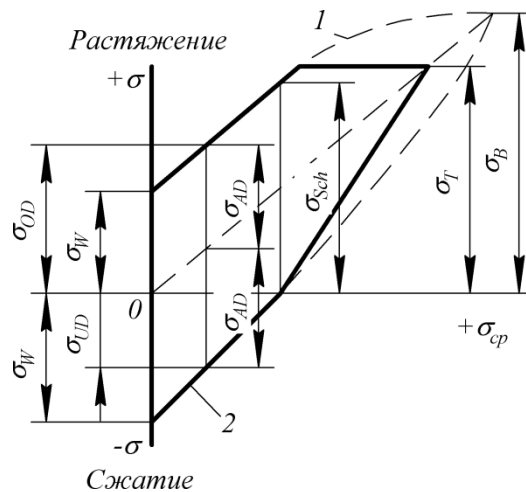


Рис. 25.16. Диаграмма предельных напряжений цикла (диаграмма Смита) для положительного среднего напряжения: 1 – границная линия максимального напряжения; 2 – границная линия минимального напряжения

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

Предел выносливости при симметричном знакопеременном цикле нагружения ($\sigma_{\text{ср}} = 0$) определяется точками пересечения диаграммы с осью ординат, в то время как предел выносливости при нулевом 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. 25.17). Для материала, имеющего равные показатели сопротивления усталости при нагружении в области растяжения и сжатия, полные диаграммы усталости симмет-

ричны. В других случаях, как, например, у чугуна с пластинчатым графитом, они не симметричны.

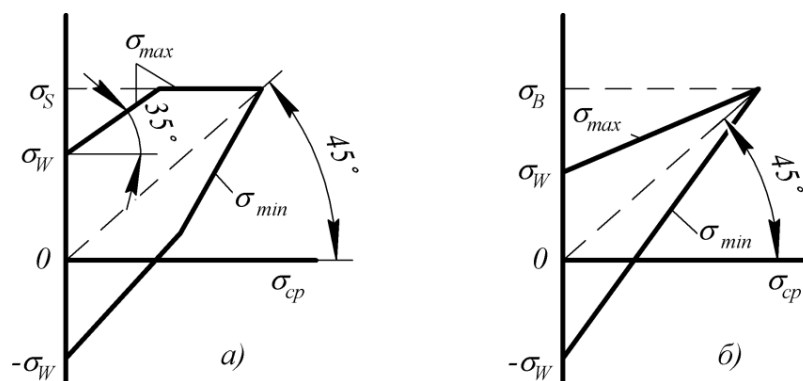


Рис. 25.17. Упрощенное построение неполных диаграмм усталости для вязких а) и хрупких б) материалов

Диаграмма Смита находит применение, прежде всего, в машиностроении; для строительных сталей используют полную диаграмму усталости Мура–Коммерса–Яспера (рис. 25.18).

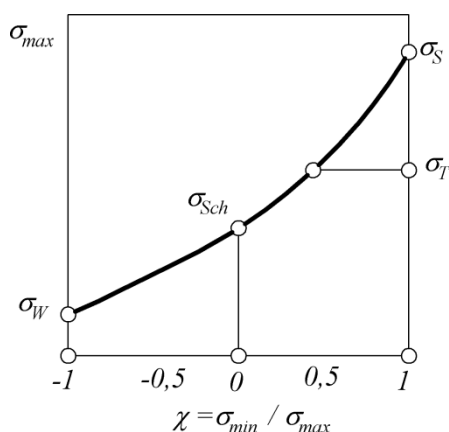


Рис. 25.18. Полная диаграмма усталости Мура–Коммерса–Яспера

При ее построении на оси ординат откладывают величину максимального напряжения σ_{max} , а на оси абсцисс – отношение минимального и максимального напряжений $\chi = \sigma_{min} / \sigma_{max}$. В механике вводят некоторые новые характеристики поведения материалов при циклическом нагружении. Наряду с построением кривых роста трещины и определением скорости ее роста da/dN в качестве критерия повреждаемости и основы для расчетного определения размеров можно выбрать (из соотношения K_{min} / K_{max}) наименьшее значение коэффициента интенсивности циклических напряжений, необходимого для дальнейшего

распространения трещины. Это 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.

Испытания с концентраторами напряжений. На усталостную прочность деталей сильно влияют изменения формы, надрезы, сверления и другие концентраторы напряжений, вызывающие их неравномерное распределение

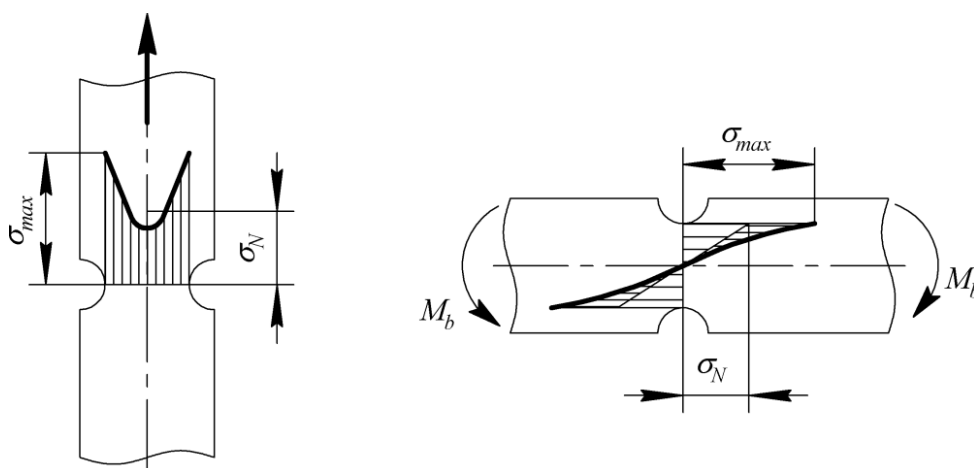


Рис. 25.19. Концентрация напряжений надреза при растяжении и изгибе

Влияние местного повышения напряжения вблизи надреза выражают теоретическим коэффициентом концентрации напряжений (рис. 25.19):

$$\alpha_K = \sigma_{\max} / \sigma_N > 1. \quad (25.14)$$

На рис. 25.20 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:

$$\beta_K = \sigma_D / \sigma'_D > 1, \quad (25.15)$$

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

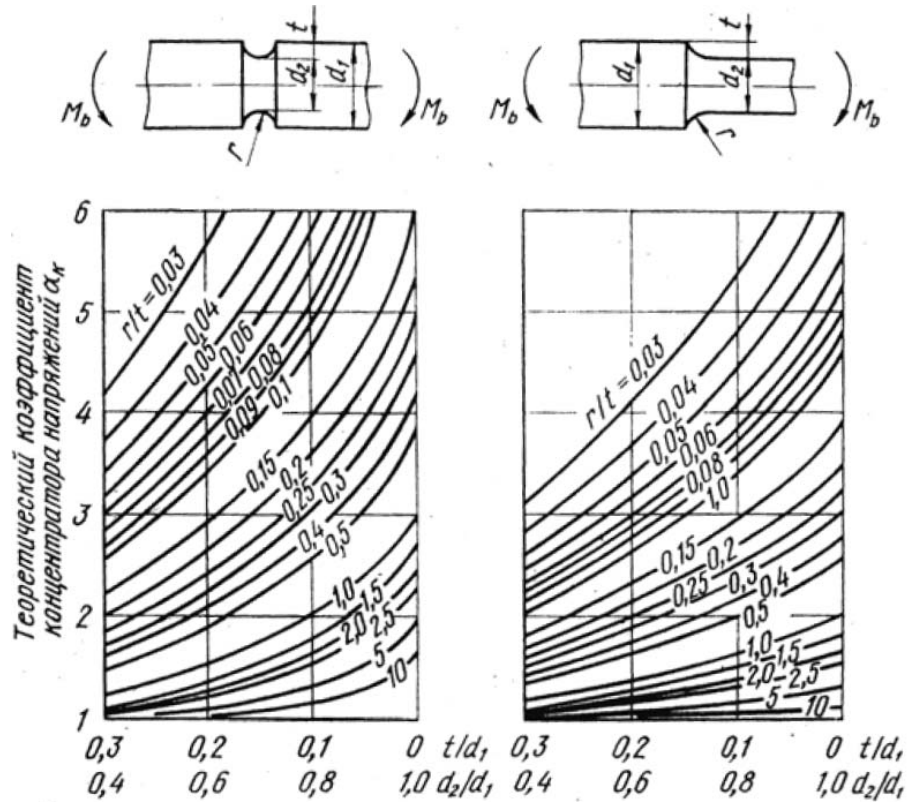


Рис. 25.20. Теоретический коэффициент концентрации напряжений α_K для вала при изгибе

Расчетная предельная прочность детали при циклическом нагружении $\sigma_n D$ может быть получена из отношения

$$\sigma_n D = \sigma_D / \beta_K. \quad (25.16)$$

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

Суммирование повреждений. При использовании двух уровней нагружения можно увеличить количество информации, получаемой с помощью кривых Велера

(рис. 25.21). При этом получают кривые повреждаемости, которые позволяют проследить за ходом накопления повреждений при циклическом нагружении. Из данных рис. 25.21, 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

$$S = n_1 / N_1 + n_2 / N_2 + \dots + n_q / N_q = \sum_{i=1}^q n_i / N_i = 1. \quad (25.17)$$

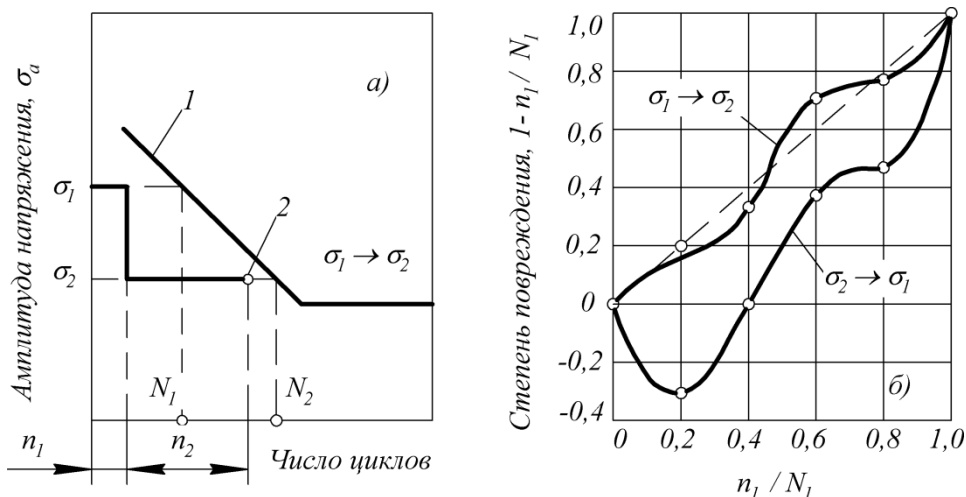


Рис. 25.21. Построение кривой повреждаемости при испытании на двух уровнях нагружения: а – схема испытания; б – кривая повреждаемости для стали, содержащей 0,35 % С, при различной последовательности нагружения; 1 – кривая Велера; 2 – разрушение при двухступенчатом нагружении

На рис. 25.21, б эта зависимость представлена в виде прямой, идущей под углом 45°.

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 вы-

носливости. Если предположить, что уравнение Майнера справедливо, то можно определить предел выносливости путем ступенчатого последовательного увеличения уровня амплитуды напряжения во время испытания (метод Локати).

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.

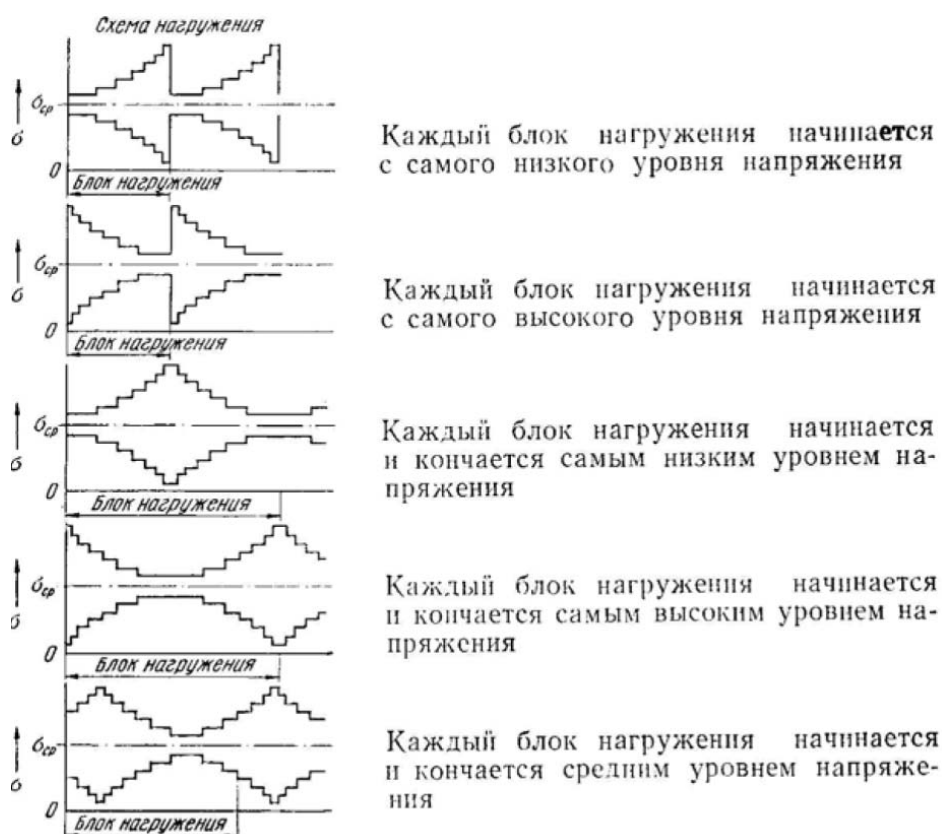


Рис. 25.22. Последовательность при испытании с программированным нагружением

Эта последовательность нагружения, называемая блоком нагружения, может быть установлена при использовании определенной классификации, согласно которой напряжения 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. 25.22) 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 перфоленту или магнитную ленту. Затем ленту вводят в электронную управляющую аппаратуру испытательной машины и с помощью регулирующей системы управляют ею.

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.

25.2.3. 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 ра-

бочем 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. 25.23 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.

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 $0 \dots 200 \text{ Гц}$ нашла широкое применение сервогидравлическая система, ранее использовавшаяся в самолето- и ракетостроении.

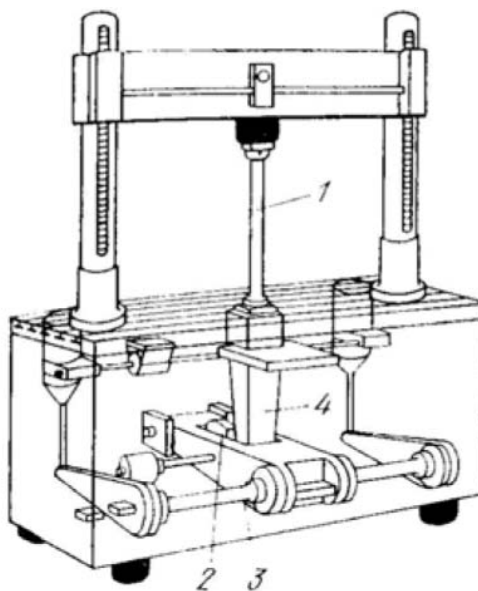


Рис. 25.23. Схема резонансной испытательной машины: 1 – образец; 2 – эксцентрик; 3 – колебательный рычаг; 4 – вибрационная головка

На рис. 25.24 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, поступающим от датчика 1, и разница между фактическим и заданным значениями в виде регулирующего отклонения поступает к сервоклапану. 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.

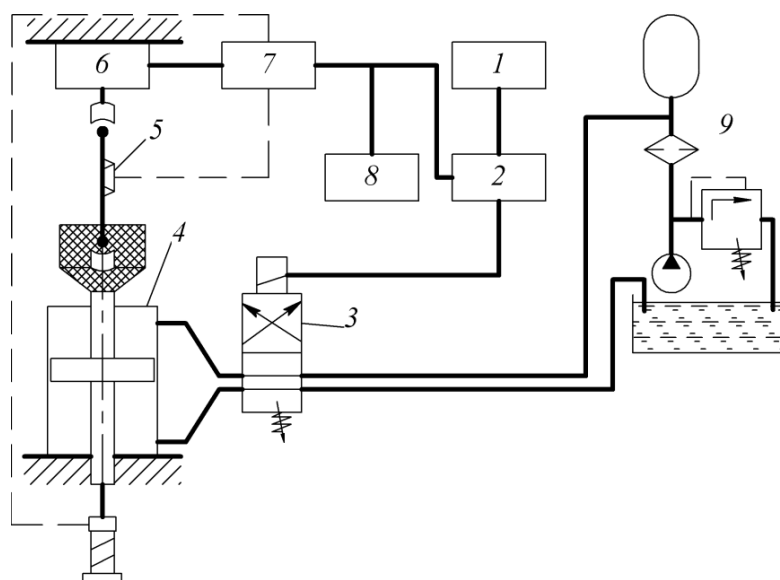


Рис. 25.24. Сервогидравлическая испытательная система (гидропульсационная система): 1 – задатчик параметра; 2 – усилитель датчика; 3 – сервоклапан; 4 – цилиндр; 5 – образец; 6 – силоизмеритель; 7 – усилитель силоизмерителя; 8 – осциллограф; 9 – насос высокого давления

В машинах для испытаний на изгиб с вращением (рис. 25.25) вращающийся образец нагружается изгибающим моментом.

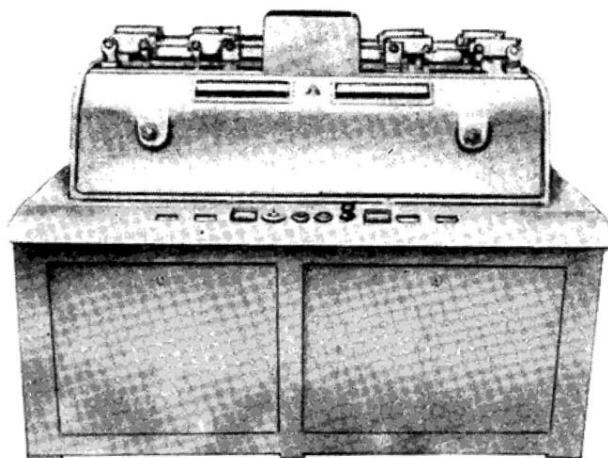


Рис. 25.25. Машина для усталостных испытаний на изгиб с вращением

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.

Для испытания деталей часто целесообразно собирать испытательное устройство по агрегатному принципу и приспособлять 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.

25.3. Испытания на ударные нагрузки

В условиях эксплуатации часто возникают ударные воздействия, например при переезде транспортных средств через выбоины, при формировании же-

лезнодорожных 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.

25.3.1. Поведение материала при повышенных скоростях деформации

На рис. 25.26 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

$$\sigma = \varepsilon E. \quad (22.18)$$

При скорости деформации $10^{-1} \dots 10^0, \text{с}^{-1}$ начинается ударная нагрузка, а выше 10^2с^{-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 $10^4, \text{с}^{-1}$ 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	
	Испытания действием статической нагрузки	Испытания с применением ударной нагрузки (опыты с ударным инструментом, со взрывом)

Ползучесть	Характеристика ползучести			Распространение взрывной волны
	Квазистатическая деформация	Переходная зона	Распространение упруго-статической волны	
	10^{-8}	10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 10^0 10^2 10^4 10^6		
	Скорость деформации, c^{-1}			
	10^6 10^4 10^2 10^0 10^{-2} 10^{-4} 10^{-6} 10^{-8}			
	Время на выполнение 1 % растяжения			

Рис. 25.26. Методы 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. 25.27 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 $120...70 K$. 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.

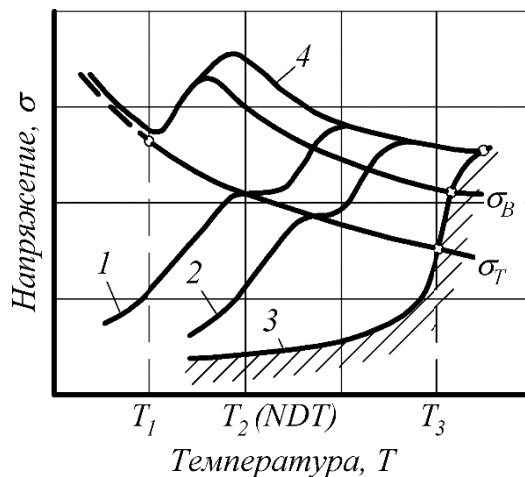


Рис. 25.27. Диаграмма разрушающее напряжение – температура для конструкционной стали: 1 – разрушающее напряжение для образца с небольшой трещиной; 2 – разрушающее напряжение для образца с трещиной большего размера или с остаточными напряжениями; 3 – предельная кривая для распространения очень длинной трещины (T_3 – температура останковки 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.

25.3.2. 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

$$W_s = W / V, \text{ Дж/мм}^3, \quad (25.19)$$

где W – работа, затрачиваемая на удар; V – объем среднего участка образца (рис. 25.28, 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 (у дна надреза) 60° (рис. 25.28, б).

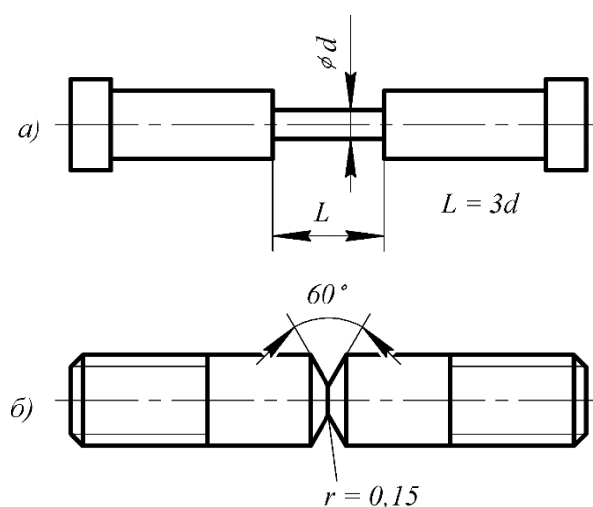


Рис. 25.28. Формы образцов для испытаний на ударное растяжение: а – без надреза; б – с надрезом

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.

25.3.3. 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.

Проведение испытаний. При проведении испытаний на ударный изгиб, надрезанный с одной стороны образец, разрушается или прогибается, насколько позволяют возможности испытательного устройства, посредством удара маятничкового 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. 25.29.

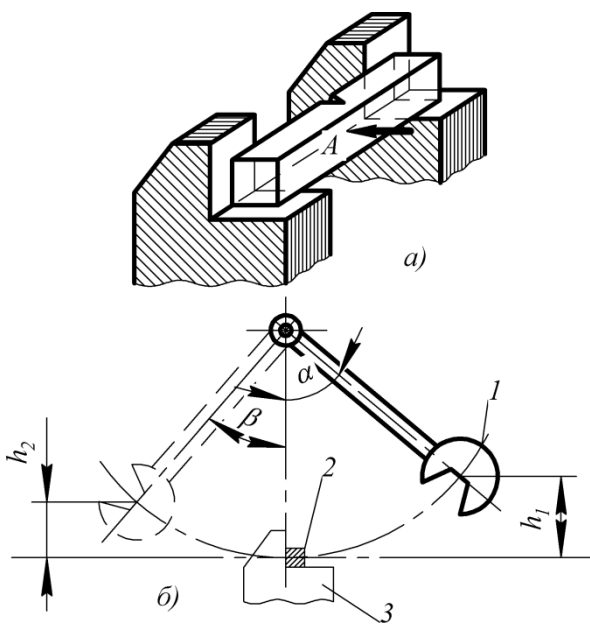


Рис. 25.29. Испытание на ударный изгиб образца с надрезом: а – расположение образца; б – схема нанесения удара; А – направление удара;
1 – маятниковый копер; 2 – образец;
3 – опора

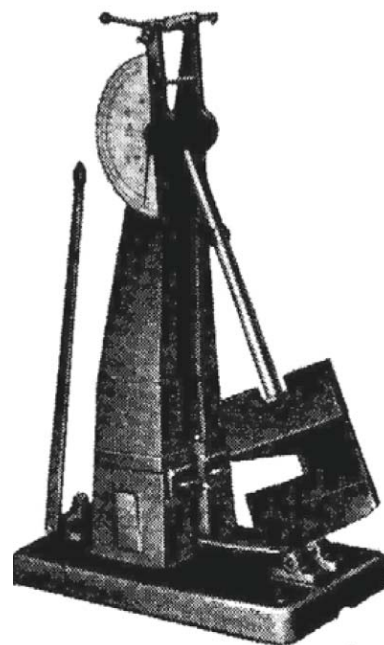


Рис. 25.30. Маятниковый копер

На рис. 25.30 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.

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:

$$V = [2gl(1 - \cos \alpha)]^{1/2} \approx (2gh)^{1/2}, \text{ м/с}, \quad (25.20)$$

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

$$W_k = G(h_1 - h_2) = Gl(\cos\beta - \cos\alpha), \text{ Дж}, \quad (25.21)$$

где G – масса маятникового груза.

Стандартные маятниковые копры имеют шкалу, которая непосредственно показывает с помощью стрелки указателя расходуемую 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

$$\alpha_k = W_k / A_0 \quad (25.22)$$

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.

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 комнат-

ной 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. 25.31.

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 гранцентрированной кубической 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.

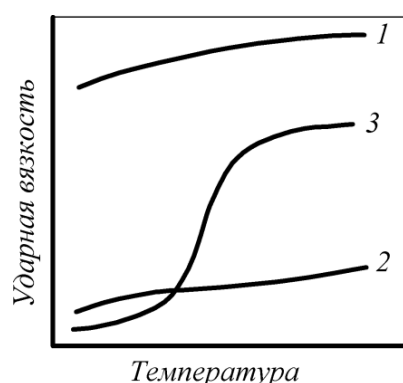


Рис. 25.31. Кривые ударная вязкость – температура для различных групп материалов: 1 – высокий уровень; 2 – низкий уровень; 3 – крутое падение

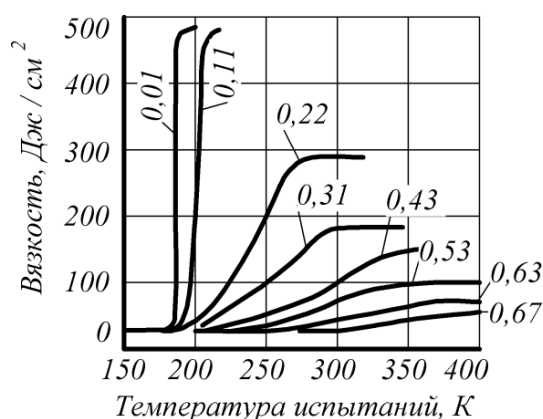


Рис. 25.32. Влияние содержания углерода в стали на ход кривой $\alpha_k - T$: образцы с острым надрезом (цифры соответствуют содержанию углерода, %)

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 удар-

ным 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 ОЦК или гексагональной решеткой. Промежуточный (ниспадающий) участок кривой имеет большое значение для характеристики сталей с ферритоперлитной 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. 25.32).

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 $T_{\text{и}}$, 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.

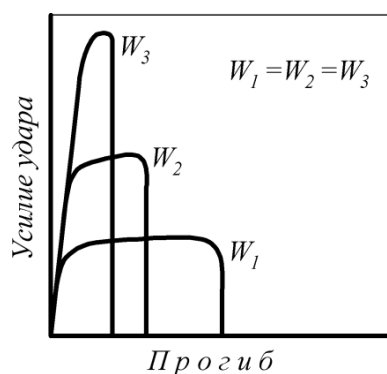


Рис. 25.33. Схематические кривые усилия удара – прогиб

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

$$W_k = \int_{f=0}^{f_c} \sigma df, \quad (25.23)$$

где f – прогиб; f_c – прогиб при разрушении образца.

Как показано на рис. 25.33, одна и та же работа удара получается при различных значениях напряжения и прогиба. По этой причине невозможно использовать рассчитываемую по работе удара ударную вязкость для определения размеров конструктивных элементов, подвергающихся ударным нагрузкам.

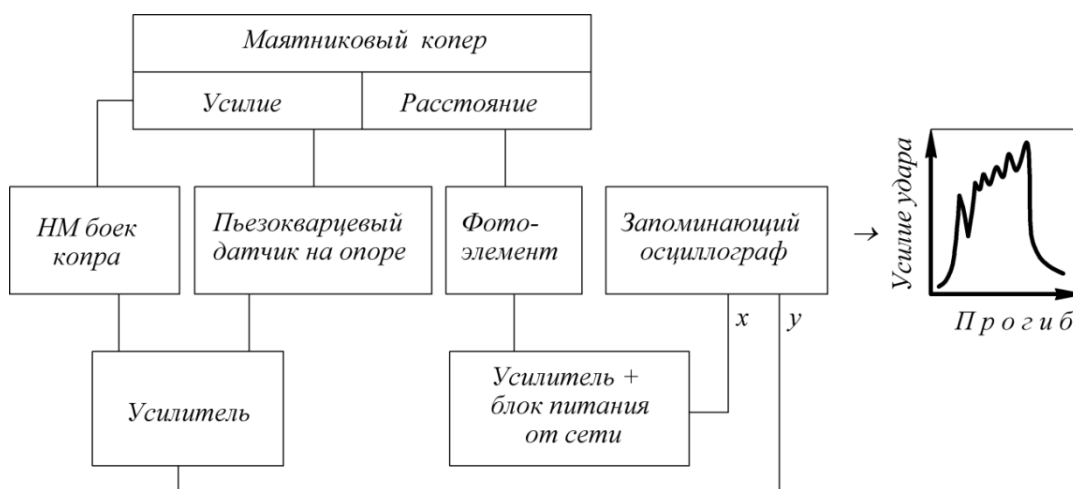


Рис. 25.34. Схема проведения испытаний на ударный изгиб с записью диаграмм разрушения

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. 22.34. 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. 25.35.

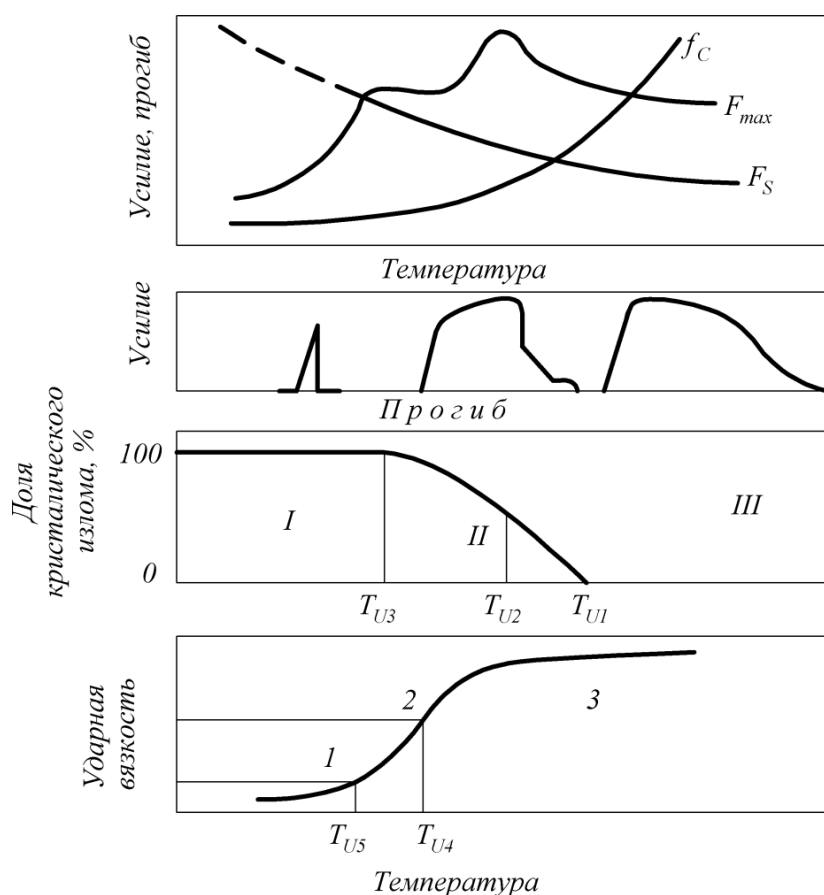


Рис. 25.35. Параметры, определяемые при испытании на ударный изгиб надрезанного образца с записью диаграммы разрушения в зависимости от температуры: F_s – усилие при переходе от упругого к упругопластическому состоянию; F_{max} – максимальное усилие при разрушении; f_c – прогиб в начале нестабильного распространения трещины; I – хрупкое разрушение; II – излом смешанного типа; III – вязкое разрушение; 1 – низкие значения вязкости; 2 – зона смешанного излома; 3 – высокие значения вязкости

25.3.4. 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.

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

там 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.

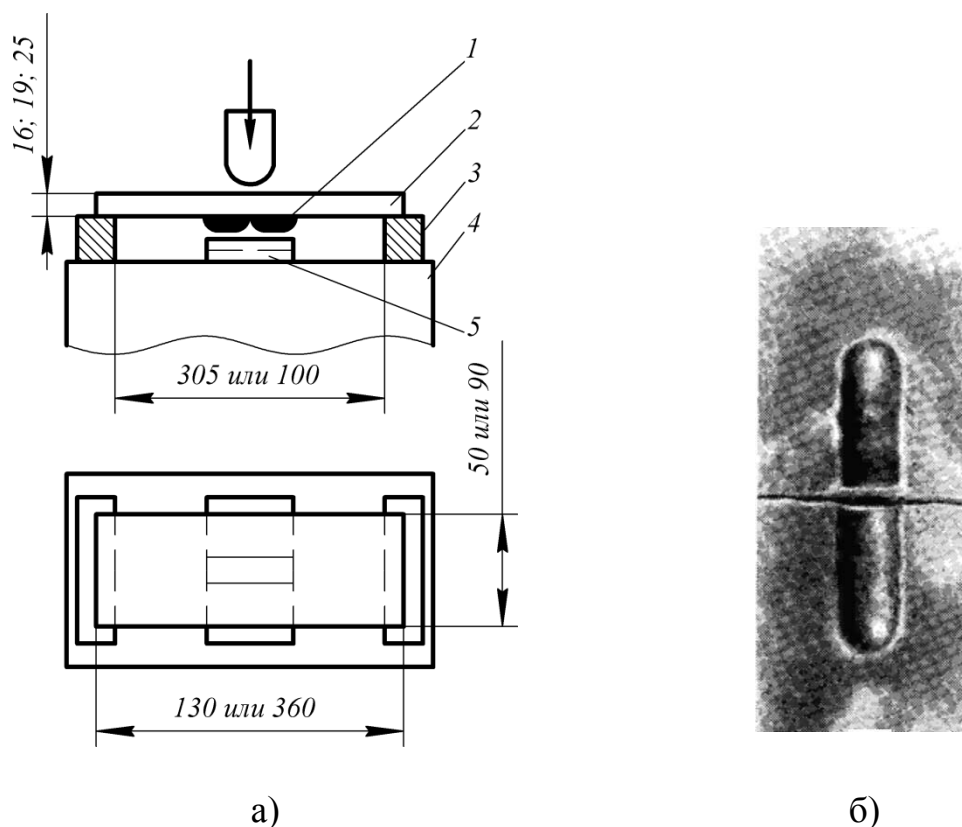


Рис. 25.36. Испытание падающим грузом: а – схема проведения испытаний; 1 – наплавленный валик с надрезом; 2 – образец; 3 – опора; 4 – плита; 5 – ограничитель; б – образец судостроительной стали после разрушения

Использование образцов с весьма острым надрезом или с предварительно нанесенной трещиной позволяет отдельно 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 Пел-

лини), 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 опорасоответствующей 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. 25.36.

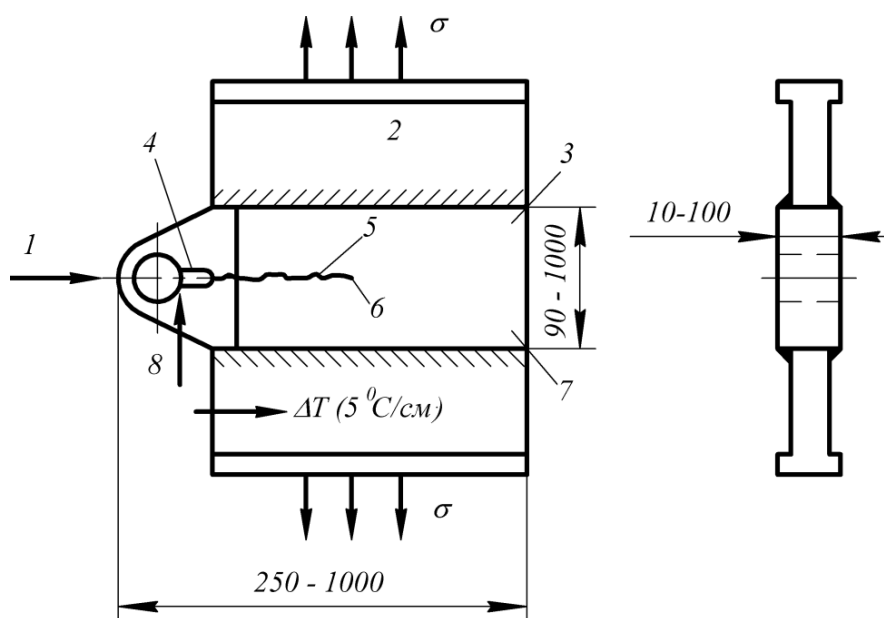


Рис. 25.37. Форма образца для испытания с остановкой трещины при градиенте температур: 1 – ударное нагружение; 2 – закрепленный лист; 3 – образец; 4 – надрез; 5 – трещина; 6 – остановка трещины; 7 – тепло; 8 – холод

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. 25.37). При проведении этого испы-

тания 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 строительного монтажного 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 САТ – Crack-Arresttemperature). Температура остановки трещины имеет особое значение для конструкций, в которых мелкие трещины не опасны, но должно быть достаточно надежно предотвращено быстро развивающееся хрупкое разрушение.

Вопросы для самоконтроля

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?

26. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

26.1. 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 твер-

дости 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.:

<i>М и н е р а л</i>	<i>Твердость по Моосу</i>
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.

26.2. 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 ($F > 30 \text{ Н}$), 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 $2 \dots 20 \text{ Н}$. 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) удается получить характеристики твердости в специфических областях. Поскольку получаемые отпечатки очень малы, можно при использовании подобных 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.

26.3. 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 $HВ$ рассчитывают как отношение приложенной

нагрузки F к поверхности A образовавшегося отпечатка (без указания размерности):

$$HВ = 0,102F / A,$$

где F – приложенная нагрузка; A – поверхность сферической лунки, мм^2 .

Поверхность отпечатка A (мм^2) 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:

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

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 $29\,420\text{ Н}$ ($29\,420 \times 0,102 = 3000$) и длительность нагружения $10 \dots 15$ 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 HB 450 справедливо равенство

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

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 HB 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 HB 350, получают завышенные значения. При твердости HB 450 максимальное отклонение составляет $\sim 2\%$, поэтому в интервале HB 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 и отме-

тить 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.

26.4. 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 шартику (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, H ; A – поверхность отпечатка, $мм^2$;

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

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.

26.5. 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 ка-

кую-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 использу-

ют метод *C*, получаемая величина твердости указывается переиндексом 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 *C* расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее 4 мм, расстояние центра отпечатков от края образца – не менее 3 мм. Испытываемый 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 пересчет величины твердости по Роквеллу на значения твердости, полученные другими методами испытаний, невозможен; для отдельных групп – при тщательном проведении сравнительных исследований.

26.6. 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 Рок-

веллу, 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

$$HK = 0,102F_1 / D \pi h,$$

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

26.7. Определение микротвердости

Определение твердости при малой нагрузке 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 высту-

пающих 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 $0,002 \dots 2 \text{ Н}$, 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 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.

26.8. 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.

26.9. 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 бойка 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 бойка 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.

26.10. 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 испыты-

ваемый материал эталонного стержня; в этом случае диаметр отпечатка в материале должен быть соответственно меньше или больше. В этих случаях метод Польди вполне применим.

26.11. 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 находит 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, действующей 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 высверленных 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 надземного и подземного строительства). Усилие при испытании составляет 523,91 Н, длительность нагружения 0,5 или 5 ч. Глубину вдавливания пуансона измеряют в миллиметрах.

26.12. 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 сдаточных. Зависимости, определенные для других материалов, например для меди, латуни, отожженной алюминиевой и оловянной бронзы ($Q_s = 5,5$ НВ), холоднодеформированной бронзы ($Q_s = 4$ НВ) или для алюминия и его сплавов ($Q_s = 3,7$ 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.

27. 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?

28. 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, приемосдаточные, 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, приемки 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).

28.1. 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, указывающим 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.

28.2. 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.

28.3. 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 забраковывания 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;
- бесповторные;

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;

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

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

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

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

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

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

k – количество изделий в выборке.

28.4. 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 применяться общая погрешность. Измерения необходимо проводить в месте сопряжения оборудования с испытуемым 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.

28.5. 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, методы и средства поверки по ГОСТ 8042.

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 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.

28.6. 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 испытуемого объекта от различных возмущающих факторов, т.е. функция, описывающая связь между входными воздействиями и контролируемыми 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 возмущающих факторов и тем самым определить состав испытательных воздействий наиболее полно определяющих реальные условия эксплуатации.

Уравнение регрессии

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

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

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

$$i = \overline{0, N}; j = \overline{0, K},$$

σ^2 – дисперсия.

Уравнение регрессии используется для определения объема выборки:

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

d – степень полинома;

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

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

$N_1 \geq \frac{t_\alpha^2 \sigma^2 C_{k+d}^d}{\Delta^2}$ – общее количество приборов, используемых при испытаниях.

При планировании наблюдений и анализе результатов испытаний, независимо от их вида, необходимо *знать*: номенклатуру объектов наблюдений и измерительно-испытательного оборудования; перечень показателей качества, подлежащих оценке по результатам наблюдений; условия эксплуатации и режим работы с учетом их изменений в течение исследований; сведения о нара-

ботке, месте и времени наступления отказа, время и способ восстановления, наименование запасных частей, время простоя, величину 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?

29. 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 испы-

таний, 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 объекта в измерительную и контрольную схему;
- выполнение заданной программы контроля или испытаний;
- фиксация результатов испытаний;
- выключение испытуемого изделия из измерительных и контрольных схем;
- открепление изделия;
- сьем 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 (транспортеры), 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.

29.1. Структура автоматизированных систем испытаний

Автоматизированные системы испытаний являются одним из звеньев общей интегрированной системы автоматизации производства. На рис. 29.1 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 тоже время не загружает центральную ЭВМ управлением производственными объектами, позволяя руководству завода сосредоточиться на глобальном планировании и управлении производством.

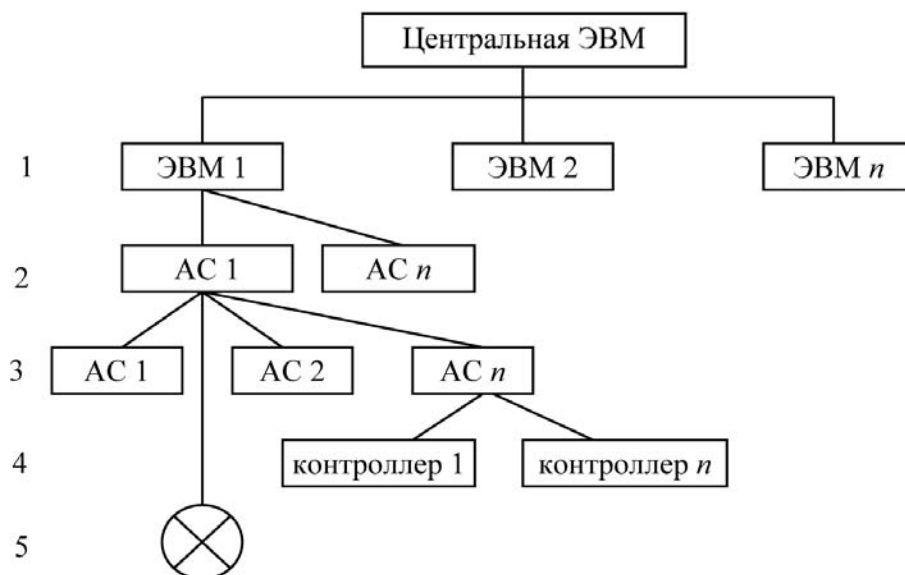


Рис. 29.1. Иерархия автоматизированных систем

Датчики в автоматизированных системах могут подключаться по нескольким схемам.

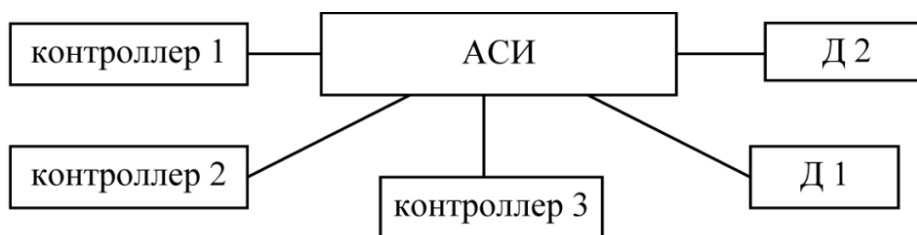


Рис. 29.2. Радиальная структура

Преимущество радиальной системы, представленной на рис. 29.2, – 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.

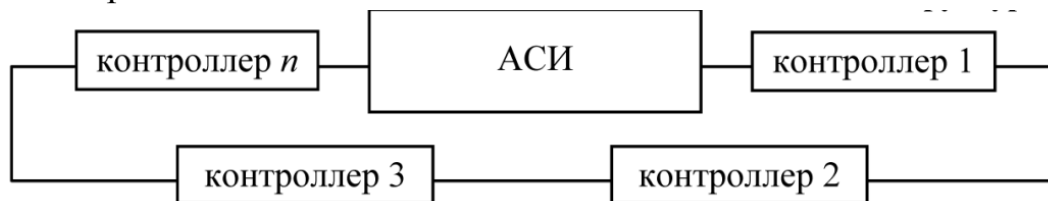


Рис. 29.3. Кольцевая структура

На рис. 29.3 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. 29.4). 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.

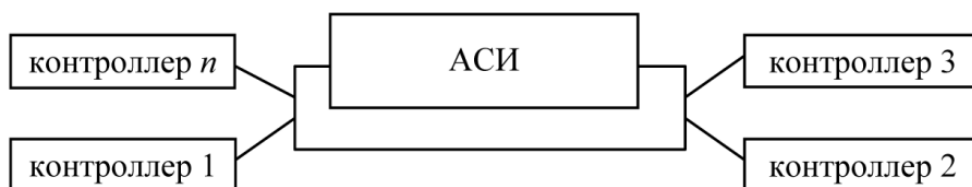


Рис. 29.4. Радиально-кольцевая структура

Автоматизированная система включает в себя ряд элементов обеспечения.

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 дан-

ных автоматизированной системы испытаний, в том числе формы документов в виде видеограмм и протокола обмена данными.

Лингвистическое обеспечение АСИ – тезаурусы (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 блет, 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.).

На рис. 29.5 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.

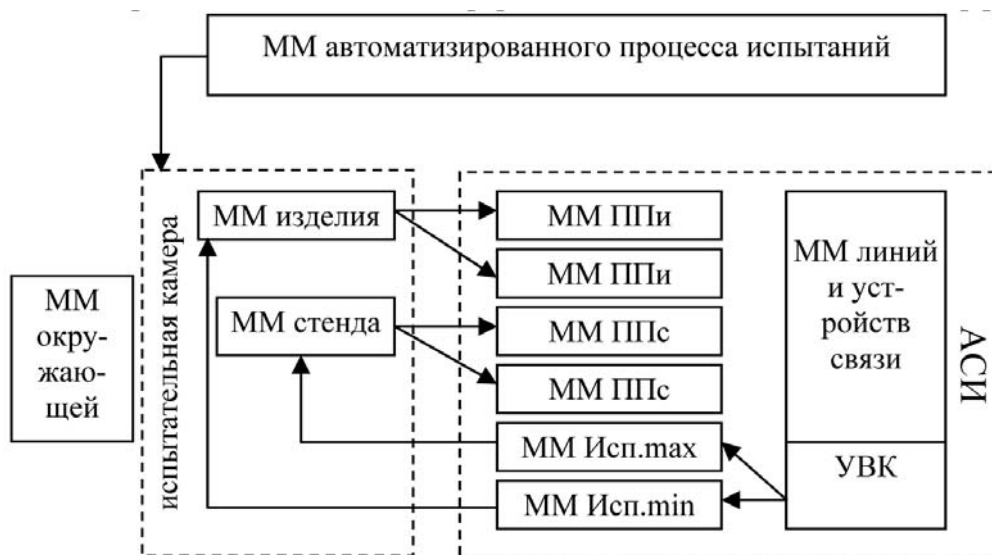


Рис. 29.5. Структура математического обеспечения АСИ: ММ – математическая модель; ППс – первичный преобразователь стенда; ППи – первичный преобразователь изделия

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

30. АККРЕДИТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Основным документом, определяющим процедуру аккредитации испытательных лабораторий на независимость и техническую компетентность, является ГОСТ Р 51000.4-2008.

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 комплектом 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 над 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, Р 51000.4;
- создавать необходимые условия для проведения аккредитующим органом инспекционного контроля над деятельностью испытательной лаборатории, повторной аккредитации испытательной лаборатории и принятия решений по жалобам, включая доступ полномочным аккредитующим 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?

31. ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

Аттестации подлежат: испытательное оборудование, воспроизводящие нормированные внешние воздействия или нагрузку.

Аттестация испытательного оборудования проводится с целью определения нормированных точностных характеристик оборудования, их соответствия НД и установление пригодности оборудования к эксплуатации.

К нормированным точностным характеристикам относят, установленные НД характеристик, определяющих возможность оборудования воспроизводить и поддерживать режимы и условия испытаний в заданных диапазонах с требуемой точностью и стабильностью в течение установленного срока.

Аттестации подлежат опытные образцы, серийно выпускаемое и модернизированное оборудование, оборудование, изготовленное в единичном экземпляре, импортное оборудование.

В зависимости от области применения испытательное оборудование подразделяется на следующие категории: общепромышленного применения, отраслевого применения, специального применения.

31.1. Порядок проведения аттестации

Испытательное оборудование должно подвергаться *первичной, периодической* и в случае необходимости *повторной аттестации*(ГОСТ 8.568).

Первичная аттестация соответствует метрологической аттестации.

Периодической и повторной – соответствуют периодическая и внеочередная поверки средств измерений.

Первичная, периодическая, повторная аттестации должны проводиться при аттестации испытательного оборудования *общепромышленного применения* в соответствии с *государственными стандартами* или методическими указаниями на методы и средства аттестации испытательного оборудования.

По испытательному оборудованию *отраслевого применения* в соответствии с *отраслевыми стандартами* или какой-либо другой документации испытательного оборудования.

31.2. Первичная аттестация испытательного оборудования

Цель первичной аттестации испытательного оборудования:

1. Исследования с целью определения возможностей испытательного оборудования воспроизводить и поддерживать режимы и условия испытаний в заданных диапазонах с требуемой точностью и в установленные сроки;
2. Исследования с целью определения действительных значений нормирования точностных характеристик и их соответствие НД;
3. Исследования с целью определения погрешностей измерения и регистрации их параметров в испытательных режимах;
4. Исследования с целью определения перечня нормированных точностных характеристик подлежащих проверке в процессе эксплуатации;
5. Исследования с целью определения методов и средств последующих аттестаций и их периодичности;
6. Определение требований безопасности и охраны окружающей среды.

Первичная аттестация опытных образцов и серийно выпускаемого испытательного оборудования проводится как обязательная часть государственных приемочных квалификационных испытаний.

31.2.1. Перечень документов необходимых для первичной аттестации испытательного оборудования

1. Утверждение технического задания.
2. Эксплуатационные документы, в которые входят: программа первичной аттестации, проект методики.

Результаты первичной аттестации опытных образцов и серийно выпускаемого испытательного оборудования оформляется аттестатом или протоколом испытаний в соответствии со стандартами на данный документ.

31.3. Периодическая аттестация испытательного оборудования

Ее проводят в процессе эксплуатации испытательного оборудования испытательными подразделениями или организацией, применяющих это оборудование с участием метрологической службы данного предприятия по программам утвержденным руководителям данного предприятия.

Периодическая аттестация проводится в объеме необходимом для проверки точностных и нормированных характеристик на соответствие требованиям НД или для установления пригодности испытательного оборудования, проведения испытаний в соответствии с действующей НД на методы испытания этой продукции.

Периодичность аттестации устанавливается с учетом стабильности проверяемых параметров условий и интенсивности испытания оборудования.

Результаты оформляются протоколом испытаний или аттестатом, обязательно делается запись в сопроводительной документации.

31.4. Повторная аттестация

Повторная аттестация проводится при вводе в эксплуатацию испытательного оборудования, после транспортировки или длительности хранения, после ремонта, модернизации, капитальные переделки фундамента, после перемещения оборудования установленных стационарно, если данные операции приводят к изменению нормированных точностных характеристик и при ухудшении качества выпускаемой продукции.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(рекомендуемое)

Форма аттестата

АТТЕСТАТ № _____

_____ дата выдачи

Удостоверяется,
что _____
(наименование и обозначение испытательного
_____ ,
оборудования, заводской или инвентарный номер)
принадлежащее _____
наименование предприятия (организации), подразделения, центра
по результатам первичной аттестации, протокол № ____ от _____,
признан пригодным для использования при испытани-
ях _____
наименование продукции

_____ ПО
_____ наименование и обозначение документов на
_____ методики испытаний (при необходимости)

Периодичность периодической аттестации _____ (месяцев, лет)

Аттестат выдан _____
наименование предприятия (организации), выдавшей аттестат

Руководитель предприятия Личная Расшифровка
(организации), выдавшего аттестат подпись подписи

(печать)

**Протокол периодической (повторной)
аттестации испытательного оборудования**

Б.1 Протокол периодической (повторной) аттестации испытательного оборудования содержит следующие данные:

Б.1.1 Основные сведения об испытательном оборудовании [наименование, тип, заводской (инвентарный) номер, наименование завода-изготовителя].

Б.1.2 Проверяемые характеристики испытательного оборудования.

Б.1.3 Условия проведения периодической (повторной) аттестации: температура, влажность, освещенность и т.п.

Б.1.4 Результаты периодической (повторной) аттестации

Б.1.4.1 Внешний осмотр (отсутствие повреждений, функционирование узлов, агрегатов, наличие эксплуатационных документов на испытательное оборудование и документов, подтверждающих сведения о поверке (калибровке) встроенных или входящих в комплект средств измерений).

Б.1.4.2 Характеристики средств измерений, используемых для проведения периодической, (повторной) аттестации испытательного оборудования [наименование, тип, заводской (инвентарный) номер, наименование завода-изготовителя], и сведения об их поверке (калибровке).

Б.1.4.3 Значения характеристик испытательного оборудования, полученные при предыдущей аттестации.

П р и м е ч а н и е — Вместо содержания протокола по Б. 1.4.2 и Б. 1.4.3 могут быть приложены соответствующие документы.

Б.1.4.4 Значения характеристик испытательного оборудования, полученные при периодической (повторной) аттестации.

Б.1.5 Заключение о соответствии испытательного оборудования требованиям нормативных и эксплуатационных документов на испытательное оборудование и на методики испытаний продукции конкретных видов.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. ПР 50.2.008-94 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок аккредитации головных и базовых организаций метрологической службы государственных органов управления Российской Федерации и объединений юридических лиц.

2. МИ 2647 – 2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок аккредитации организаций на право аттестации испытательного оборудования, применяемого в интересах обороны и безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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.
4. Гусев, Н.Г. Защита от ионизирующих излучений: В 2-х т. / Н.Г.Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Ионизирующие излучения и их измерения. Термины и понятия. – М.: Стандартиформ, 2006.
6. Моисеев, А.А. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. – 2-е изд., перераб. и доп. /А.А. Моисеев, В.И. Иванов. – М.: Атомиздат, 1974.
7. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99). Минздрав России, 1999.
8. Серегин, М.Ю. Организация и технология испытаний. Ч. 1: Методы и приборы испытаний: учеб. пособие / М.Ю. Серегин. – Тамбов: Тамбов. гос. техн. ун-т, 2006.
9. Серегин, М.Ю. Организация и технология испытаний. Ч. 2: Автоматизация испытаний: учеб. пособие / М.Ю. Серегин. – Тамбов: Тамбов. гос. техн. ун-т, 2006
10. Испытательная техника: справочник: В 2-х кн./ под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982 – Кн.1. 1982.
11. Испытательная техника: справочник: В 2-х кн./ под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982 – Кн.2. 1982.
12. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение. София: Техника, 1980.
13. Секацкий, В.С. Основы сертификации: учеб. пособие / В.С. Секацкий. – Красноярск: КГТУ, 1998.
14. Сергеев, А.Г. Метрология: учеб. пособие для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. – М.: Логос, 2000.
15. Качество продукции, испытания, сертификация. Терминология. Справочное пособие. Вып. 4. – М.: Изд-во стандартов, 1989.

16. Хорина, О.В. Классификация видов испытаний /О.В. Хорина. – М.: Машиностроение, 1997. – 215 с.
17. Балагезян, Ю.Г. Ускоренные испытания на надежность и факторный анализ результатов наблюдений /Ю.Г. Балагезян, Ж.С. Мельницкая. – Л: ЛДНТП, 1973.
18. Кольман, И.Г. Метрологическое обеспечение испытаний аппаратуры, приборов и элементов на воздействие внешних факторов /И.Г. Кольман. – М.: Машиностроение, 1988.
19. Судаков, Р.С. Испытания технических систем /Р.С. Судаков. – М.: Машиностроение, 1988.
20. Ивович, В.А. Защита от вибраций в машиностроении / В.А. Ивович, В.Я. Онищенко. – М.: Машиностроение, 1990.
21. Башков, В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кащеев. – М.: Машиностроение. 1985.
22. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: учеб. пособие для вузов/ О.П. Глудкин и др.; под ред. А.И. Коробова. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.
23. Перечень ГОСТов по климатическому воздействию: 20.57.406-81, 16019-78, 22261-76, 16962-71, 15150-69, 24682-81, 12997-76, 15151-69 (теплоустойчивость, холодоустойчивость), 17676-81, 24631-81, 18298-79, 17785-72, 14254-80, 24981-81, 9.048-75, 17786-72, 24728-81
24. ГОСТ 3.15.07-84 ЕСТД. Правила оформления документов на испытания.
25. ГОСТ 8.001-80 ГСИ. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений.
26. ГОСТ 8.383-80 ГСП. Государственные испытания средств измерений. Основные положения
27. ГОСТ 12997-84 СГИП. Условия проведения испытаний.
28. ГОСТ 16504-81 СГИП. Испытания и контроль качества продукции. Основные положения, термины и определения.
29. ГОСТ 21964-76. Внешние воздействующие факторы. Номенклатура и характеристика.
30. ГОСТ 24555-81 МУ. СГИП. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения.
31. РД 50-360-81 СГИП. Общие требования к разработке и аттестации методик испытаний.

32. РД 50-502-84 МУ. Показатели точности, достоверности и воспроизводимости результатов испытаний. Основные положения.
33. Международный стандарт ИСО 9003-94. Системы качества. Модель обеспечения качества при окончательном контроле и испытаниях. М.: Издательство стандартов, 1996.
34. ГОСТ Р 51000.1-95. Система аккредитации органов по сертификации, испытательных и измерительных лабораторий
35. ГОСТ Р 51000.3-96. общие требования к испытательным лабораториям.
36. ГОСТ Р 51000.4-96. система аккредитации в российской федерации. общие требования к аккредитации испытательных лабораторий.
37. ПР 50.2.008-94 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок аккредитации головных и базовых организаций метрологической службы государственных органов управления Российской Федерации и объединений юридических лиц.
38. МИ 2647 – 2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок аккредитации организаций на право аттестации испытательного оборудования, применяемого в интересах обороны и безопасности.
39. Журнал “Измерительная техника”.
40. Журнал “Приборы и техника эксперимента”
41. Журнал “Управление, контроль, диагностика”.