

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования

«Витебский государственный технологический университет»

А.К. Новиков

**ИСПЫТАНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КОНТРОЛЬ
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Конспект лекций

для студентов специальности 1-36 01 04

«Оборудование и технологии высокоэффективных процессов
обработки материалов» специализации 1-36 01 04 04

«Оборудование и технологии обработки металлополимерных изделий»

Витебск

2012

УДК 678.7-1 (075.8)
ББК 35.712
Н73

Рецензент:

Пятов В.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки», УО «ВГТУ».

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ». Протокол № _____ от _____.

Н73 Новиков, А. К. Испытание надежности и контроль металлополимерных изделий : конспект лекций / А. К. Новиков. – Витебск : УО «ВГТУ», 2012. – 124 с.

ISBN 978-985-481-268-7

Конспект лекций содержит основные понятия, определения и методики оценки механических, технологических и эксплуатационных свойств пластмасс, а также понятия теории надежности, технической диагностики и методы расчета их показателей.

Конспект лекций предназначен для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов» специализации 1-36 01 04 04 «Оборудование и технологии обработки металлополимерных изделий» высших учебных заведений.

УДК 678.7-1 (075.8)
ББК 35.712

ISBN 978-985-481-268-7

© Новиков А.К., 2012
© УО «ВГТУ», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
ЧАСТЬ I. ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА.....	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ...	5
Глава 2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.....	11
Глава 3. ЭТАПЫ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ.....	17
Глава 4. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ.....	20
Глава 5. СХЕМЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ.....	25
Глава 6. НАЗНАЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ....	31
Глава 7. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ.....	35
Глава 8. МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ.....	43
ЧАСТЬ II. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ.....	50
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	50
Глава 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. ТВЕРДОСТЬ.....	53
Глава 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. ПРОЧНОСТЬ.....	58
Глава 4. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.....	67
Глава 5. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.....	74
Глава 6. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.....	80
Глава 7. ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА.....	87
Глава 8. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.....	97
Глава 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.....	104
Глава 10. СВОЙСТВА ГОРЮЧЕСТИ ПЛАСТМАСС.....	111
Глава 11. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	119
Рекомендуемая литература.....	122

Введение

В последние несколько десятилетий наблюдается устойчивый рост производства полимеров и материалов на их основе, проникновение их в самые разные области. Полимерные материалы с успехом заменяют многие традиционные материалы – металлы, керамику, стекло, древесину и т.д. Технология полимеров открывает широкие перспективы для разработки новых материалов с уникальными свойствами.

Быстрое развитие индустрии полимеров и изделий из них ставит вопросы оценки надежности и качества полимерной продукции. На предприятиях соответствующего профиля широко используют отечественные и зарубежные методы оценки надежности изделий из полимеров, и молодой инженер должен иметь представление о том, как проводятся проектные расчеты надежности и испытания по современным методикам.

Конспект лекций по дисциплине «Испытания надежности и контроль металлополимерных изделий» знакомит студентов с основными понятиями и определениями теории надежности, методами расчета показателей надежности технических систем и расчетными методами технической диагностики. Также в конспекте лекций представлены термины и определения в области испытания материалов, приведены стандартизованные методики оценки механических, технологических и эксплуатационных свойств пластмасс, дана общая характеристика неразрушающих методов контроля качества продукции.

ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1 Термины теории надежности

Термины и их определения в области надежности регламентирует ГОСТ 27.002 – 89 «Надежность в технике», который содержит 85 терминов.

Первая группа терминов описывает объекты контроля – *система, элемент*.

Система – это технический объект, предназначенный для выполнения определенных функций. Сокращенное название – ТС (техническая система). Характеристики ТС приведены на рисунке 1.1.

Элемент – это объект, представляющий собой простейшую часть системы, отдельные части которой не представляют самостоятельного интереса в рамках конкретного рассмотрения.

Вторая группа терминов определяет критерии надежности. В машиностроении рассматривается надежность различных видов изделий. Это может быть станок, узел, агрегат, комплекс и даже отдельная деталь или элемент.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Надежность включает в себя следующие свойства – *безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность*.

Безотказность – свойство ТС непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость – свойство ТС непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и транспортирования.

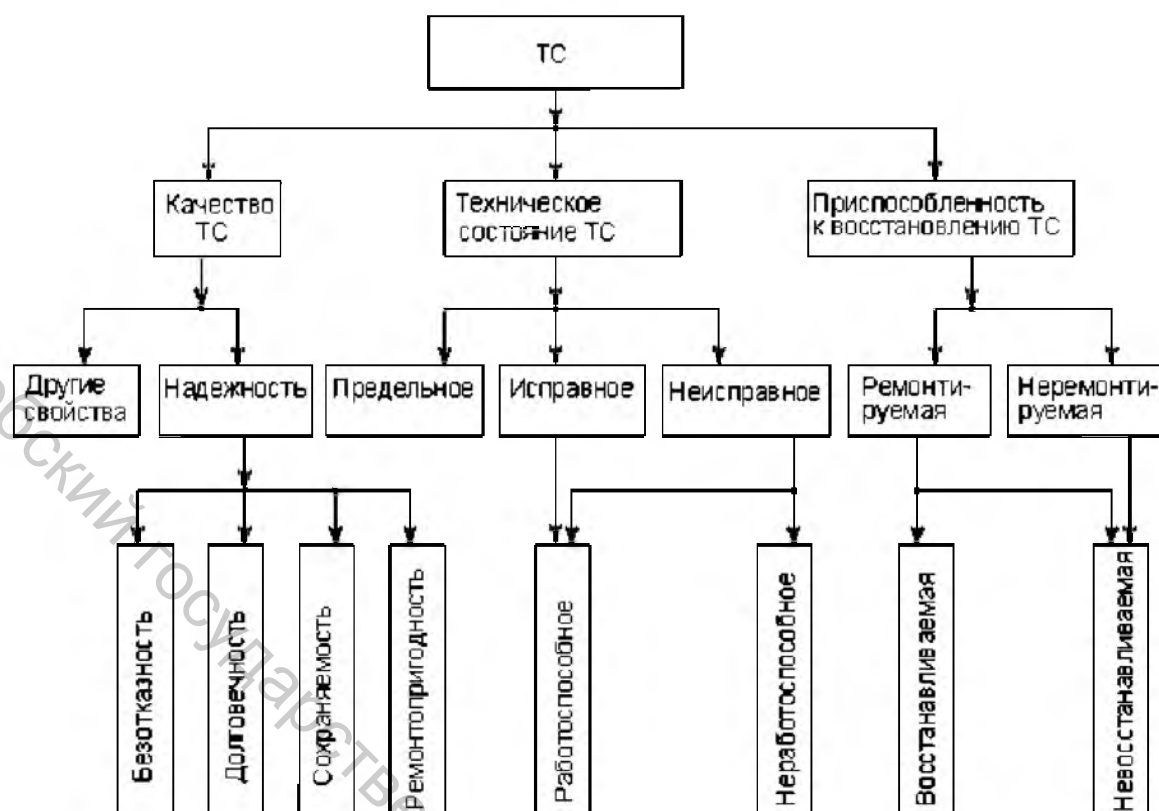


Рисунок 1.1 – Основные характеристики ТС

Данное свойство является очень важным, т. к. оно характеризует степень стандартизации и унификации элементов ТС, удобство их размещения с точки зрения доступности для контроля и ремонта, приспособляемость к регулировочным операциям и т. д.

Техническая система (машина, станок, автоматическая линия) может находиться в следующих состояниях – *исправном, неисправном, неработоспособном, предельном* (рис. 1.2).

Исправное состояние (исправность) – такое состояние ТС, при котором она соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

Неисправное состояние (неисправность) – такое состояние ТС, при котором она не соответствует хотя бы одному из этих требований, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

Работоспособное состояние (работоспособность) — состояние ТС, при котором она способна выполнить заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией (НТД).

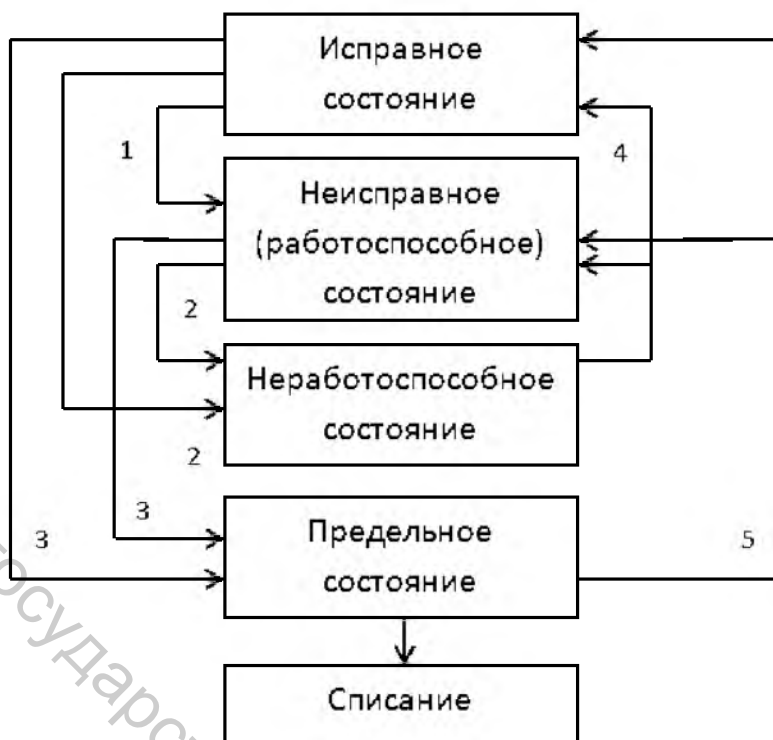


Рисунок 1.2 – Основные состояния технической системы:
1 – повреждение; 2 – отказ; 3 – переход в предельное состояние; 4 – восстановление; 5 – ремонт

Неработоспособное состояние (неработоспособность) – состояние ТС, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего их способность выполнять заданные функции, не соответствует установленным требованиям НТД.

Понятие исправности шире понятия работоспособности. Неисправная ТС может быть работоспособной и неработоспособной – все зависит от того, какому требованию НТД не удовлетворяет данная ТС. Исправная ТС всегда работоспособна.

Предельное состояние – состояние ТС, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности, при уходе заданных параметров за установленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, или необходимости проведения среднего или капитального ремонта.

Исходя из возможности дальнейшего использования после отказа и приспособленности к восстановлению, все ТС можно классифицировать следующим образом (рис. 1.3).

Восстанавливаемая ТС – такая система, работоспособность которой в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации.

Невосстанавливаемая ТС – такая система, восстановление работоспособности которой при ее отказе по каким-либо причинам признается нецелесообразным или неосуществимым.

Ремонтируемая ТС – такая система, неисправность или работоспособность которой в случае возникновения отказа или повреждения подлежат восстановлению.

Неремонтируемая ТС – такая система, неисправность или работоспособность которой в случае возникновения отказа или повреждения не подлежат восстановлению.

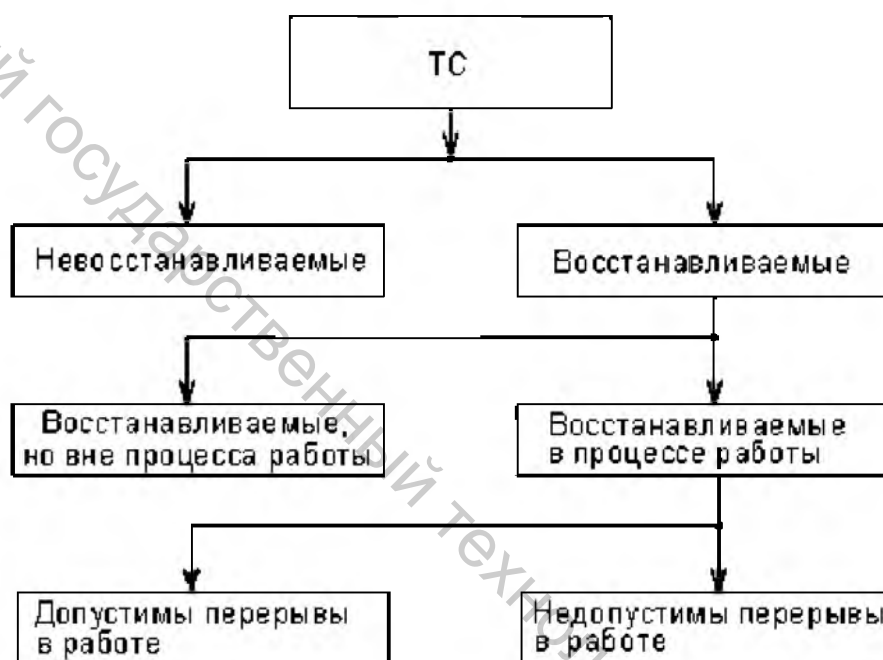


Рисунок 1.3 – Классификация ТС после отказа

1.2 Повреждения и отказы

Повреждение — некоторое событие, которое заключается в нарушении исправного состояния при сохранении работоспособного состояния.

Повреждение может быть существенным и явиться причиной отказа и несущественным, при котором работоспособность ТС сохраняется.

Переход машины из работоспособного состояния в неработоспособное происходит в результате отказа. Отказы следует отличать от повреждений, при которых изделие становится не соответствующим хотя бы одному из требований технических условий, но сохраняет свою работоспособность.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

По специфике проявления бывают *внезапный* и *постепенный* отказы.

Внезапный отказ характеризуется скачкообразным изменением значений лимитирующего параметра (рис. 1.4). Это отказ функционирования, приводящий к внезапному останову машины или нарушению нормального режима работы (шум, удары, вибрации, нагрев, потеря скорости, мощности и др.). Отказ наступает, когда значение параметра превышает установленное предельно допустимое значение $U_{пр}$. Это может произойти неожиданно в произвольные моменты времени t_1 , t_2 или t_3 .

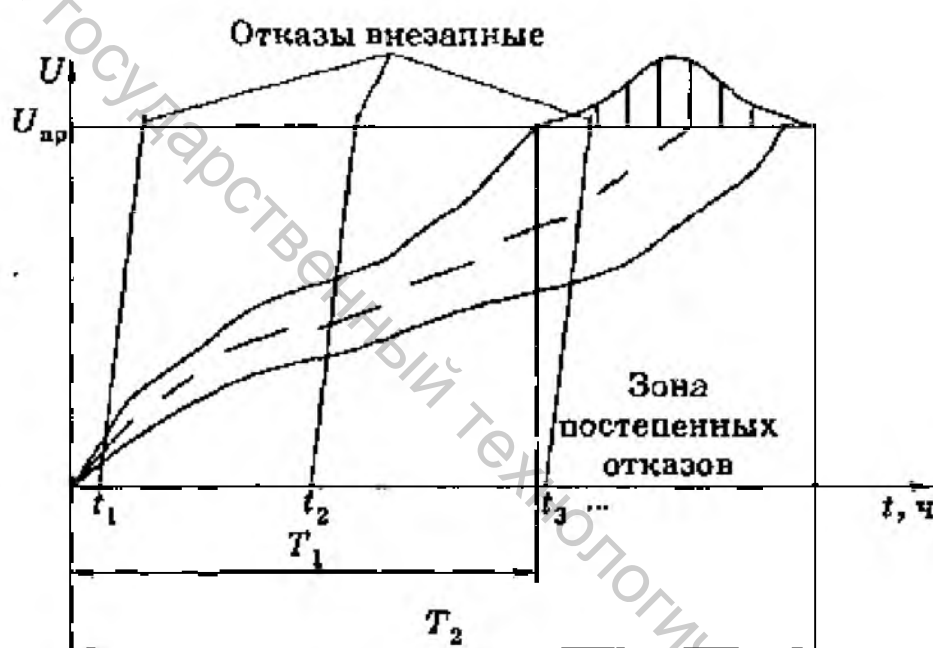


Рисунок 1.4 – График появления внезапных и постепенных отказов

Постепенный (износный) отказ характеризуется постепенным изменением значений параметров объекта, а также наличием тенденции, или закономерности, их изменения во времени (рис. 1.4). Постепенные отказы можно прогнозировать.

Катастрофический отказ – разрушение конструкций, взрывы (и другие чрезвычайные ситуации), создающие опасность для жизни людей или влекущие большой материальный ущерб, должны быть исключены с помощью специальных расчетов и испытаний. Они не входят в систему количественных оценок теории надежности.

По связи с отказами других элементов отказы бывают независимые и зависимые.

Независимый отказ объекта (изделия) не обусловлен отказом другого объекта (изделия). Причиной возникновения независимых отказов являются внутренние физико-химические процессы, происходящие в изделии.

Зависимый отказ объекта связан с отказом другого объекта. Например, сгорел элемент электрической сети из-за перегрузки (превышение напряжения).

По характеру проявления отказов выделяют *сбои, перемежающиеся, самоустраняющиеся и устойчивые* отказы.

Сбой – самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременному нарушению работоспособности.

Перемежающийся отказ — это многократно возникающий и затем самоустраняющийся отказ одного и того же характера. Перемежающиеся отказы могут возникать из-за плохого электрического контакта в месте соединения, когда от случайных вибраций электрический контакт то появляется, то исчезает. Перемежающиеся отказы, как правило, возникают из-за некачественной сборки и отладки изделия.

Самоустраняющийся отказ – это отказ, устраняемый вмешательством оператора, называется сбоем. Такой отказ устраняется перед запуском изделия или путем воздействия на органы управления, например, корректировкой положения заготовки при механической обработке.

Устойчивый отказ – это отказ, устраняемый только в результате проведения восстановительных работ, является следствием необратимых процессов в деталях и материалах.

По причине возникновения отказы бывают: *конструкционный, производственный и эксплуатационный*.

Конструкционный отказ возникает вследствие несовершенства конструкции изделия или грубой ошибки при его конструировании (например, из-за несоблюдения стандартов, норм или правил конструирования).

Производственный отказ является результатом применения при изготовлении или ремонте изделия ТП несоответствующего качества или из-за их нарушения.

Эксплуатационный отказ вызван нарушением правил или условий эксплуатации изделия. Эти отказы могут возникнуть, в частности, из-за перегрузки изделия недопустимыми силами или в результате эксплуатации изделия в климатических условиях, на которые оно не рассчитано.

Глава 2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Показатели надежности – количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надежность элемента (системы).

Различают два основных вида показателей надежности (ПН) – *единичные и комплексные*.

Единичный ПН – это количественная характеристика одного из рассмотренных ранее свойств надежности.

Комплексный ПН – это количественная характеристика, определяющая два или более свойств надежности одновременно.

2.1 Единичные ПН безотказности

В качестве показателей безотказности невосстанавливаемых элементов применяют следующие количественные характеристики:

- *вероятность безотказной работы*,
- *вероятность отказа*,
- *интенсивность отказов*,
- *плотность распределения наработки до отказа* (до первого отказа).

Вероятность $p(t)$ безотказной работы – это вероятность того, что за время t отказа не произойдет.

Если принять момент первого включения за начало отсчета, то вероятность безотказной работы запишется в виде функции надежности:

$$p(t) = P\{\xi > t\}, t \geq 0.$$

Наработка до первого отказа ξ – это случайная величина, представляющая собой интервал времени от момента включения устройства до первого отказа.

Вероятность $q(t)$ отказа элемента есть вероятность того, что отказ произойдет через время, не превышающее данной величины t ($\xi \leq t$). Другими словами – это вероятность события противоположного тому, когда $\xi > t$, и может быть записано в виде функции ненадежности:

$$q(t) = P\{\xi \leq t\} = 1 - p(t), t \geq 0.$$

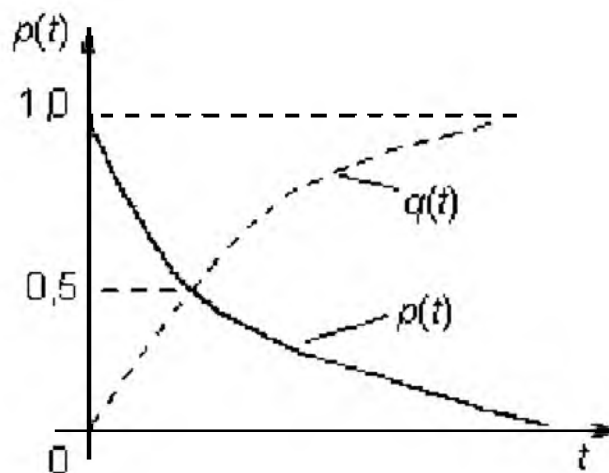


Рисунок 1.5 – Вероятность безотказной работы и вероятность отказа

Интенсивностью отказов называется функция $\lambda(\tau)$, которая представляет собой предел отношения $q(t/\tau)$ при $t \rightarrow 0$.

Аналитически ее можно записать как:

$$\lambda(\tau) = \frac{\omega(\tau)}{p(\tau)}, \text{ если } \tau \geq 0.$$

Плотность распределения наработки до отказа является характеристикой безотказности системы и может быть представлена функцией:

$$\omega(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}.$$

В таблице 1.1 представлена функциональная взаимосвязь между показателями надежности (свойство безотказности).

Таблица 1.1 – Функциональная связь между ПН безотказности

Известный ПН	Формулы для определения остальных ПН			
	$q(t)$	$\omega(t)$	$p(t)$	$\lambda(t)$
$q(t)$	—	$\frac{dq(t)}{dt}$	$1 - q(t)$	$\frac{1}{1 - q(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt}$
$\omega(t)$	$\int_0^t \omega(t) dt$	—	$1 - \int_0^t \omega(t) dt$	$\frac{\omega(t)}{1 - \int_0^t \omega(t) dt}$
$p(t)$	$1 - p(t)$	$-\frac{dp(t)}{dt}$	—	$-\frac{1}{p(t)} \cdot \frac{dp(t)}{dt}$
$\lambda(t)$	$1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)$	$\lambda(t) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)$	$\exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)$	—

2.2 Единичные ПН восстанавливаемости

В качестве показателей восстанавливаемости элементов применяются следующие количественные характеристики:

- *вероятность восстановления,*
- *вероятность невозможности восстановления,*
- *интенсивность восстановления,*
- *плотность распределения времени восстановления.*

Вероятностью восстановления (ВВ) называется вероятность того, что после момента наступления отказа работоспособность устройства будет восстановлена за время, не превышающее заданное время t . Вероятность восстановления можно записать в виде функции следующего вида (рис. 1.6).

$$p_v = P\{\eta \leq t\}, t \geq 0.$$

Наработка до восстановления η – случайная величина, представляющая собой интервал времени от момента отказа до момента восстановления.

Вероятность невозможности восстановления (ВНВ) на заданном интервале времени, т. е. вероятность того, что $\eta > t$, равна:

$$q_v = p\{\eta > t\} = 1 - p_v.$$

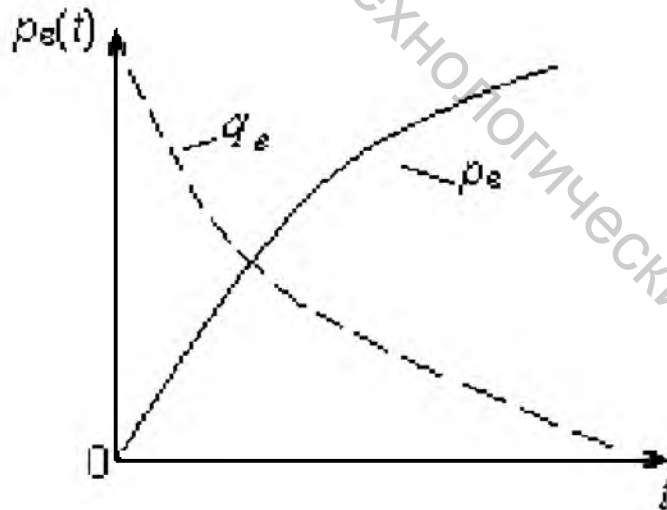


Рисунок 1.6 – Вероятность восстановления и невозможности

Функция $p_v(t)$ представляет собой интегральную функцию распределения случайной величины η . Эта функция монотонно возрастает от 0 (при $t = 0$) до 1 (при $t \rightarrow \infty$).

Интенсивностью восстановления называется функция $\mu(\tau)$

$$\mu(\tau) = \frac{\omega_v(\tau)}{1 - p_v(\tau)}.$$

Плотность распределения времени восстановления или частота восстановления равна:

$$\omega_B = \frac{dp_B(t)}{dt}, t \geq 0.$$

В таблице 1.2 приведены основные соотношения, устанавливающие функциональную связь между ПН восстановления.

Таблица 1.2 – Функциональная связь между ПН восстановления

Известный ПН	Формулы для определения остальных ПН			
	$p_B(t)$	$q_B(t)$	$\omega_B(t)$	$\mu(t)$
$p_B(t)$	—	$1 - p_B(t)$	$\frac{dp_B(t)}{dt}$	$\frac{1}{1 - p_B(t)} \cdot \frac{dp_B(t)}{dt}$
$q_B(t)$	$1 - q_B(t)$	—	$-\frac{dq_B(t)}{dt}$	$-\frac{1}{q_B(t)} \cdot \frac{dq_B(t)}{dt}$
$\omega_B(t)$	$\int_0^t \omega_B(t) dt$	$1 - \int_0^t \omega_B(t) dt$	—	$\frac{\omega_B(t)}{1 - \int_0^t \omega_B(t) dt}$
$\mu(t)$	$1 - \exp\left(-\int_0^t \mu(t) dt\right)$	$\exp\left(-\int_0^t \mu(t) dt\right)$	$\mu(t) \cdot \exp\left(-\int_0^t \mu(t) dt\right)$	—

2.3 Единичные ПН долговечности

В качестве показателей долговечности элементов применяют следующие количественные характеристики:

- *средний срок службы ТС,*
- *гамма-процентный срок службы ТС,*
- *ресурс ТС,*
- *гамма-процентный ресурс ТС.*

Календарная продолжительность от начала эксплуатации ТС до перехода в предельное состояние называется **сроком службы ТС**. Если срок службы ТС – случайная величина (T_{cc}), то показатель долговечности t_{cc} может определяться как **средний срок службы**:

$$t_{cc} = m_1[T_{cc}]$$

или **гамма-процентный срок службы** t_γ , который определяется соотношением:

$$P\{T_{cc} > t_\gamma\} = \gamma/100.$$

Таким образом, t_γ – это календарная продолжительность от начала эксплуатации ТС, в течение которой ТС не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ (выраженной в процентах).

Ресурсом ТС называют наработку системы до предельного состояния, при достижении которого дальнейшая эксплуатация прекращается. При этом долговечность ТС обычно характеризуют наработкой системы, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ .

Эту наработку называют **гамма-процентным ресурсом**. Для определения этого ресурса необходимо задать функцию распределения ресурса. Более простым показателем является средний ресурс.

2.4 Единичные ПН сохраняемости

Срок сохраняемости – продолжительность хранения системы в определенных условиях, в течение которой сохраняются установочные показатели ее качества.

Иногда сохраняемость характеризуют продолжительностью хранения, в течение которой ТС сохраняет установленные показатели с заданной вероятностью γ . Эта продолжительность хранения называется **гамма-процентным сроком сохраняемости**. Для ее определения необходимо знать функцию распределения срока сохраняемости.

2.5 Комплексные ПН

Комплексные ПН предназначены для изучения последовательности случайных событий, которые представляют собой повторяющиеся отказы, следующие за многократными восстановлениями. Последовательность отказов называется *потокот отказов*.

В качестве комплексных показателей применяют следующие количественные характеристики:

- *ведущая функция потока отказов,*
- *интенсивность потока отказов,*
- *параметр потока отказов,*
- *функции готовности и простоя,*
- *коэффициенты готовности и простоя.*

Важнейшей характеристикой потока отказов является математическое ожидание числа отказов на интервале $(0, t)$. Эта характеристика называется **ведущей функцией потока отказов** $H(t)$:

$$H(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t),$$

где $F_n(t)$ – вероятность того, что на интервале $(0, t)$ произошло не менее n отказов.

Интенсивность потока отказов обозначается через $\omega_{\text{ИПО}}$:

$$\omega_{\text{ИПО}}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{dF_n(t)}{dt}.$$

Величина $\Omega(t)$ называется **параметром потока отказов**. Она представляет собой дифференциальную вероятность отказа восстанавливаемого устройства и равна

$$\Omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{dF_n(t)}{dt} = \omega_{\text{ипо}}(t).$$

Функцией готовности $G(t)$ (ФГ) называется зависимость вероятности работоспособности системы в произвольный момент времени от текущего времени.

Вероятность того, что в произвольный момент времени t устройство не будет работоспособно, называется **функцией простоя** (ФП):

$$g(t) = 1 - G(t).$$

Функцию готовности $G(t)$ иногда называют *нестационарным коэффициентом готовности*, функцию простоя $g(t)$ – *нестационарным коэффициентом простоя*.

Функция готовности равна:

$$G(t) = p(t) + \int_0^t p(t - \tau) \cdot \Omega(\tau) d\tau.$$

Функция простоя равна:

$$g(t) = 1 - p(t) - \int_0^t p(t - \tau) \cdot \Omega(\tau) d\tau.$$

Коэффициентом готовности (K_{Γ}) называется асимптотическое значение функции готовности $G(t)$ при неограниченном возрастании аргумента t , т. е.

$$K_{\Gamma} = \lim_{t \rightarrow \infty} G(t).$$

Коэффициентом простоя K_{Π} называется асимптотическое значение функции простоя при неограниченном возрастании аргумента t .

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma}.$$

Глава 3. ЭТАПЫ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ

Под анализом надежности ТС следует понимать определение (вычисление) конкретных значений показателей надежности, либо статистических оценок показателей надежности.

Существуют два основных этапа анализа надежности ТС.

Первый этап называется **априорным анализом** надежности и обычно проводится на стадии проектирования ТС. Априорный анализ базируется на априорных (вероятностных) характеристиках надежности, которые лишь приблизительно отражают действительные процессы в ТС.

Второй этап называется **апостериорным анализом** надежности. Его проводят на основании статистической обработки экспериментальных данных о работоспособности и восстанавливаемости ТС, полученных в процессе их отработки, испытаний и эксплуатации. Целью таких испытаний является получение оценок показателей надежности ТС и ее элементов.

Для проведения апостериорного расчета надежности используются две модели испытаний:

- оценка надежности *невосстанавливаемых* элементов;
- оценка надежности *восстанавливаемых* элементов.

3.1 Апостериорный анализ надежности невосстанавливаемых элементов

В качестве оценок надежности невосстанавливаемого элемента используются статистические значения следующих ПН:

- вероятность безотказной работы $p(t)$;
- вероятность отказа $q(t)$;
- частота отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя продолжительность безотказной работы T_{cp} .

Статистическая оценка вероятности безотказной работы на заданном промежутке времени – отношение количества работающих элементов к первоначальному числу испытываемых при условии, что отказавшие элементы не восстанавливаются:

$$p(t) \rightarrow \bar{p}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0},$$

где $n(t)$ – число изделий, отказавших за время t ; N_0 – количество изделий в начале испытаний.

Статистическая оценка вероятности отказа на заданном промежутке времени – отношение количества отказавших элементов к первоначальному числу испытываемых при условии, что отказавшие элементы не восстанавливаются:

$$q(t) \rightarrow \bar{q}(t) = \frac{n(t)}{N_0}.$$

Статистическая оценка частоты отказов – отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу испытываемых при условии, что отказавшие элементы не восстанавливаются:

$$f(t) \rightarrow \bar{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t},$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших изделий в интервале времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$.

Статистическая оценка интенсивности отказов – отношение числа отказавших элементов в единицу времени к среднему числу исправно работающих в данном интервале времени:

$$\lambda(t) \rightarrow \bar{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \cdot \Delta t},$$

где N_{cp} – среднее число исправно работающих изделий в интервале Δt .

Статической оценкой средней наработки до первого отказа является отношение:

$$\bar{T}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{cp} \cdot n(\Delta t)}{N_0}.$$

3.2 Апостериорный анализ надежности восстанавливаемых элементов

Условия использования данной группы элементов заключаются в том, что все элементы при их выходе из строя заменяются новыми. Таким образом, выборка элементов остается постоянной. Количественными характеристиками надежности, в данном случае, являются:

- параметр потока отказов $\Omega(t)$;
- наработка на отказ t_{cp} ;
- коэффициент готовности K_G ;
- коэффициент вынужденного простоя $K_{П}$.

Статистическая оценка параметра потока отказов – отношение числа отказавших элементов в единицу времени к числу испытываемых элементов при условии, что все вышедшие из строя элементы заменяются исправленными:

$$\Omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t},$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших образцов в интервале времени; N_0 – число испытываемых элементов; Δt – интервал времени.

Статистическая оценка наработки на отказ – среднее значение времени между соседними отказами. Эта характеристика определяется по статистическим данным об отказах по формуле:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где t_i – время исправной работы ЭРН между $(i-1)$ -ым и i -ым отказами; n – число отказов за некоторое время t .

Статистическая оценка коэффициента готовности K_r – отношение времени исправной работы к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев, взятых за один и тот же календарный срок:

$$K_r = \frac{t_p}{t_p + t_{\Pi}},$$

где t_p – суммарное время исправной работы; t_{Π} – суммарное время вынужденного простоя.

$$t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi}; \quad t_{\Pi} = \sum_{i=1}^n t_{\Pi i},$$

где t_{pi} – время исправной работы между $(i-1)$ -ым и i -ым отказами; $t_{\Pi i}$ – время вынужденного простоя после i -го отказа; n – число отказов.

Статистическая оценка коэффициента вынужденного простоя K_{Π} – отношение времени вынужденного простоя к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев, взятых за один и тот же календарный срок.

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\Pi}}{t_p + t_{\Pi}}.$$

Глава 4. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

4.1 Методы и средства повышения надежности технических систем

Можно выделить четыре группы мероприятий по повышению надежности ТС при их проектировании:

- *системные;*
- *структурные (схемные);*
- *конструктивные;*
- *эксплуатационные.*

К **системным** методам относятся организационно-экономические мероприятия по стимулированию повышения надежности и ряд технических мероприятий.

Одним из путей стимулирования повышения надежности является включение в стоимость ТС затрат на гарантийные ремонт и обслуживание. При этом разработчик учитывает, что при повышении надежности уменьшаются затраты на гарантийный ремонт и обслуживание, т. е. прибыль становится наибольшей при определенном значении показателя надежности, превышающем максимально допустимый уровень. В этом случае разработчики и изготовители ТС стремятся узнать этот уровень и достигнуть его. Следовательно, стимулируются точные оценки надежности и ее повышение.

Другим путем стимулирования повышения надежности является планирование расходов на весь срок службы проектируемой ТС. Технические мероприятия по оформлению показателей надежности проектируемых ТС необходимы при любой системе взаимоотношений заказчика и разработчика. К техническим мероприятиям относятся учет внешних воздействий на проектируемые технические средства:

- а) рабочие (тяжелый ударно-вибрационный режим, температурный режим, агрессивная химическая среда);
- б) климатические (температура, влажность, примеси в воздухе).

Структурные (схемные) методы объединяют мероприятия по повышению надежности ТС путем совершенствования принципов их построения.

Эти методы отличаются большим разнообразием и интенсивно развиваются. К ним относятся, например, варианты построения ТС, нечувствительных к появлению отказов, за счет введения избыточных аппаратных и программных средств. При этом могут использоваться и аппаратные (например, резервированные) и программные (например, сравнение результатов избыточных вычислений) средства. В ряде слу-

чаев также могут применяться и аппаратно-программные средства обнаружения отказов элементов и восстановления ТС.

К **конструктивным** методам относятся мероприятия по созданию или подбору элементов, узлов или блоков ТС, созданию благоприятных режимов работы, принятию мер по облегчению ремонтов и т. д. При этом обычно оказываются более надежными те элементы, узлы или блоки ТС, которые не имеют перемещающихся деталей, тонких обмоток, накаливаемых нитей и прочее.

Время устранения отказа можно существенно уменьшить путем построения ТС по блочно-узловому способу. При этом все ТС разбиваются на отдельные функционально законченные блоки, которые в электронных системах соединяются между собой кабелями, а в механических – связываются кинематически. Блоки, в свою очередь, разбиваются на функционально законченные узлы, выполняемые в виде легкоъемных конструкций. При таком построении ТС восстановление состоит в замене вышедших из строя блоков или узлов, что значительно ускоряет процесс ввода ТС в строй. Осуществление блочно-узловых конструкций тесно связано с унификацией элементов и систем, которая производится на основе отбора наиболее надежных вариантов. При этом не только повышается надежность ТС, но и снижается их стоимость, и упрощается изготовление. В ряде случаев удастся создать очень сложные системы из элементов всего двух-трех типов.

Планирование **эксплуатационных** мероприятий на стадии проектирования ТС состоит в разработке системы эксплуатационного обеспечения. Проектирование ТС при этом должно осуществляться в соответствии с номенклатурой работ по техническому обслуживанию. Например, для планирования периодического регулирования определяющих параметров ТС необходимо предусмотреть возможность контроля и прогнозирования значений этих параметров и т. д.

Структурные (схемные) и конструктивные методы повышения надежности безусловно являются основными для обеспечения соответствующего уровня надежности разрабатываемых ТС.

Можно выделить три **средства повышения надежности**.

В первую очередь надежность ТС достигается за счет *использования высоконадежных элементов*.

Вторым средством повышения надежности является обеспечение *оптимальных режимов работы элементов*.

Третьим средством повышения надежности является *резервирование*, то есть введение избыточности.

4.2 Виды и методы резервирования технических систем

Резервированием называют структурный метод повышения надежности ТС за счет введения избыточности. Под избыточностью при этом понимают дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения ТС заданных функций. Таким образом, задачей введения избыточности является обеспечение нормального функционирования ТС после возникновения отказов в ее элементах.

В соответствии с ГОСТ 13377 – 75 различают три основных вида резервирования:

- структурное;
- информационное;
- временное.

Структурное резервирование (или аппаратное) предусматривает использование избыточных элементов ТС. Суть такого вида резервирования заключается в том, что в минимально необходимый вариант системы, элементы которой называют основными, вводятся дополнительные элементы, узлы, устройства либо даже вместо одной системы предусматривается использование нескольких идентичных систем. При этом избыточные резервные структурные элементы, узлы, устройства и т. д. предназначены для выполнения рабочих функций при отказе соответствующих основных элементов, узлов и устройств.

Информационное резервирование предусматривает использование избыточной информации. Простейшим примером реализации такого вида резервирования является использование специальных кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки, которые появляются в результате сбоев и отказов аппаратуры. Здесь следует заметить, что использование информационного резервирования влечет за собой также необходимость введения избыточных элементов.

Временное резервирование предусматривает использование избыточного времени. В случае применения этого вида резервирования предполагается возможность возобновления функционирования ТС после того, как оно было прервано в результате отказа, путем его восстановления. При этом также предполагается, что на выполнение ТС необходимой работы отводится время, заведомо большее минимально необходимого.

Перечисленные виды резервирования могут быть применены либо к ТС в целом, либо к отдельным их элементам или к группам таких элементов. В первом случае резервирование называется **общим**, во втором – **раздельным**.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получило структурное резервирование. ТС с использованием этого вида резервирования могут классифицироваться по различным признакам, основными из которых являются:

- реакция ТС на появление отказа;
- режим работы резервных элементов;
- вид схемы резервирования;
- способ включения резервных элементов;
- степень избыточности и т. д.

В первую очередь различные резервированные ТС отличаются одни от других реакцией на появление отказов, т. е. своими «динамическими» свойствами. С этой точки зрения различают два метода резервирования: **активное** и **пассивное**.

В первом случае структура ТС такова, что при появлении отказа она перестраивается, и происходит восстановление работоспособности, т. е. происходит как бы «саморемонт» ТС. При этом ТС активно реагирует на появление отказа. Отсюда и название метода резервирования.

При пассивном резервировании ТС отказ одного или даже нескольких элементов не влияет на его работу. Элементы соединены постоянно и перестроения структуры не происходит. ТС как бы пассивно сопротивляется появлению отказов элементов.

Как при активном, так и при пассивном методах резервирования большое значение имеют режимы работы резерва. Однако, если в первом случае для расчета важно знать нагрузку на резервные элементы (режим работы) до появления отказа, то во втором случае – после появления отказа.

По этому классификационному признаку для активного резервирования различают *нагруженный*, *облегченный* и *ненагруженный* резервы.

Нагруженный резерв – резервный элемент находится в том же режиме, что и основной. При этом принимается, что характеристики надежности резервных элементов в период их пребывания в качестве резервных и в период их использования вместо основных после отказа последних остаются неизменными.

Облегченный резерв – резервный элемент находится в менее нагруженном режиме, чем основной. При этом принимается, что характеристики надежности резервных элементов в период их пребывания в качестве резервных выше, чем в период их использования вместо основных после их отказа.

Ненагруженный резерв – резервный элемент практически не несет нагрузки до начала выполнения им функций основного элемента. При этом принимается, что такой резервный элемент, находясь в резерве, отказывать не должен, т. е. обладает в этот период «идеальной» надежностью. В период же использования резервного элемента вместо основного после отказа последнего надежность резервного элемента становится равной надежности основного.

При отказе хотя бы одного из элементов ТС с пассивным резервированием может изменяться нагрузка, воспринимаемая элементами, оставшимися работоспособными. Именно поэтому, в ТС с пассивным резервированием большое значение имеют условия работы элементов после появления отказа, т. е. стабильность нагрузки на элементы, оставшиеся работоспособными. По этому признаку различают три вида ТС с пассивным резервированием:

- с *неизменной нагрузкой* (при отказе одного или нескольких элементов не меняется нагрузка на элементы, оставшиеся работоспособными);

- с *перераспределением нагрузки* (при отказе хотя бы одного элемента изменяется, обычно в сторону увеличения, нагрузка на элементы, оставшиеся работоспособными);

- с *нагрузочным резервированием* (резервированием по нагрузке), в которых при отказе хотя бы одного элемента ТС выходят из строя, но интенсивность отказов элементов уменьшена за счет того, что нагрузка, которую должен был воспринимать один элемент, воспринимается несколькими элементами.

Глава 5. СХЕМЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Для расчета надежности проектируемых ТС при использовании структурного резервирования обычно составляется *расчетно-логическая схема резервированной системы*.

Различают резервирование *общее, автономное, раздельное, единичное, внутриэлементное, скользящее и с избирательными схемами*.

Общее резервирование состоит в резервировании ТС в целом, и, благодаря своей простоте, этот способ наиболее известен.

Автономное резервирование – один из вариантов общего. Оно состоит в применении нескольких независимых объектов, выполняющих одну и ту же задачу. Каждый из этих объектов имеет свой вход и выход и, обычно, независимые источники питания. Примером объектов с автономным резервированием может служить совокупность устройств телеизмерения, выполняющих одну и ту же задачу, если каждое устройство имеет свои входные датчики, записывающие (выходные) блоки и источники питания. Автономное резервирование обычно применяется при проведении ответственных экспериментов в системах ответственного назначения. При этом автономное резервирование всегда является пассивным.

Раздельное резервирование состоит в резервировании ТС по отдельным элементам или их группам (участкам). ТС с активным общим резервированием можно считать частным случаем ТС с раздельным резервированием при одном участке резервирования.

Единичное резервирование состоит в замене элементов ТС элементарными резервированными схемами (обычно пассивными). В сложных ТС очень трудно найти рациональную схему раздельного резервирования.

Кроме того, схемы резервирования различных ТС каждый раз приходится проектировать заново, что требует иногда довольно значительных материальных затрат и времени. Поэтому единичное резервирование, при котором простейшие схемы резерва типовых элементов могут выполняться в виде готовых блоков (ячеек), часто оказывается удобным из-за простоты построения сложных резервированных ТС. При единичном резервировании не нужно составлять специальных схем, а можно просто ставить на место каждого элемента в функциональной схеме ТС его аналог – типовую резервированную ячейку.

Внутриэлементное резервирование состоит в резервировании внутренних связей элемента. Если при единичном резервировании используются схемы из существующих элементов (ячейки), то применение внутриэлементного резервирования связано с изменением конструкции элемента.

Скользящее резервирование применяется в ТС с большим количеством одинаковых элементов. Оно состоит в том, что используется небольшое число резервных элементов, которые могут подключаться взамен любого из отказавших элементов основной ТС.

При резервировании с избирательной схемой сравниваются сигналы на выходе нечетного числа параллельно работающих устройств, и во внешнюю цепь выдается сигнал, имеющийся на выходе большинства устройств. Избирательные схемы применяются в тех случаях, когда трудно установить, отказали или нет отдельные устройства.

По способу включения резервных элементов все рассмотренные выше схемы резервирования разделяются на схемы с постоянно включенным резервом (*постоянное резервирование*) и схемы резервирования замещением.

Постоянное резервирование – это такое резервирование, при котором резервные элементы участвуют в функционировании ТС наравне с основными. При этом основные и резервные элементы могут иметь общий вход и общий выход, в частности, гальваническую связь по входу и выходу, а могут быть и автономными, т. е. не иметь такой связи. При постоянном резервировании в случае отказа основного элемента не требуется специальных переключательных устройств, вводящих в действие резервный элемент, поскольку он вводится в действие одновременно с основным.

Резервирование замещением – это такое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного. При использовании этого вида резервирования необходимы контролирующие и переключающие устройства для обнаружения факта отказа основного элемента и переключения с основного на резервный.

Еще одним классификационным признаком резервированных ТС является *степень избыточности*, которая характеризуется *кратностью резервирования*.

Кратность резервирования – это отношение числа резервных элементов к числу резервируемых или основных элементов ТС. Различают *резервирование с целой и дробной кратностью*. Наиболее распространенным вариантом резервирования с дробной кратностью является такой, когда число основных элементов превышает число резервных. Резервирование, кратность которого равна единице, называется *дублированием*.

5.1 Общее резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью

Расчетно-логическая схема для постоянного включения резерва представлена на рис. 1.7.

На рисунке 1.7 основная цепь состоит из n -элементов $O_1, O_2, \dots, O_n$. Каждая из m резервированных цепей включает в себя также n элементов $P_1, P_2, \dots, P_n$.

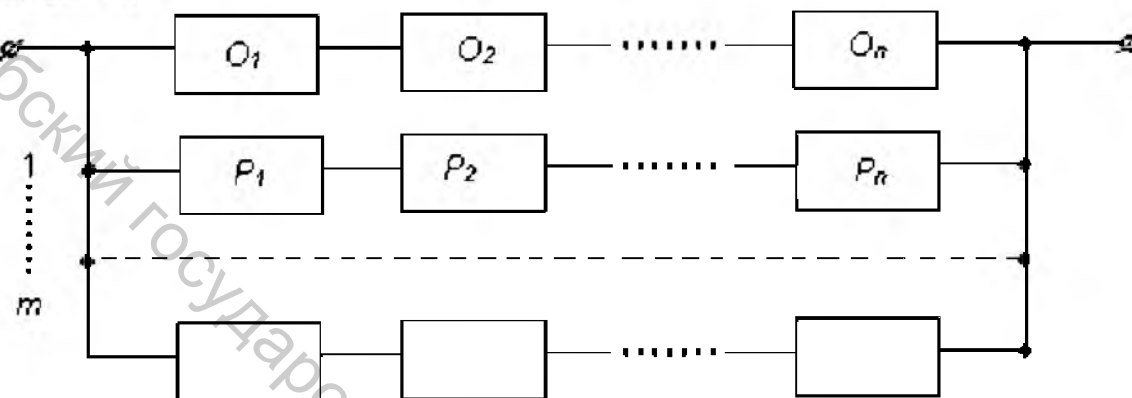


Рисунок 1.7 – Общее резервирование с постоянно включенным резервом

Основная и резервные цепи имеют одинаковую надежность. Кратность такой схемы резервирования равна m . Данная схема соответствует случаю, когда отказ ТС наступает при отказе всех $(m + 1)$ цепей как основной, так и резервных. Основная и резервная цепи включаются в работу одновременно (нагруженный резерв), но используется лишь одна цепь – основная. При отказе основной цепи ее функции без всякого перерыва начинает выполнять одна из резервных.

В этом случае вероятность безотказной работы резервированной ТС будет определяться по следующей формуле:

$$P_{ТС}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1},$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента в течение времени t ; n – число элементов основной или любой резервной цепи; m – кратность резервирования.

5.2 Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью

Расчетно-логическая схема для такого типа резервирования представлена на рис. 1.8.

При раздельном резервировании каждый элемент основной цепи O_i имеет свои резервные элементы P_i и соответственно свою кратность резервирования m_i (рис. 1.8).

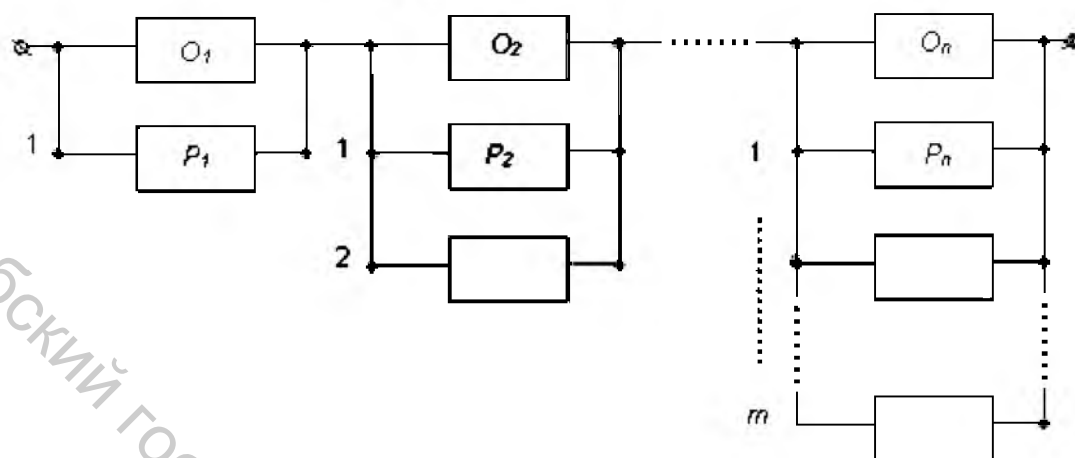


Рисунок 1.8 – Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом

Вероятность безотказной работы ТС с раздельным резервированием будет определяться как:

$$P_{TC}(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - P_i(t)]^{m_i+1}\}$$

5.3 Общее и раздельное резервирование замещением и целой кратностью

При резервировании замещением в случае отказа основной цепи (или элемента) вручную или автоматически с помощью специального переключателя в схему ТС включаются резервные цепи (или элементы). Отказ резервированной ТС при этом наступает после отказа последней резервной цепи (или элемента). Если предположить наличие «идеального» («абсолютно надежного») переключателя, то расчет вероятности безотказной работы ТС можно произвести по следующей рекуррентной формуле:

$$P_{m+1}(t) = P_m(t) + \int_0^t P(t-\tau) a_m(\tau) d\tau,$$

где $P_{m+1}(t)$, $P_m(t)$ – вероятность безотказной работы резервированной ТС кратности $(m+1)$ и m соответственно; $P(t-\tau)$ – вероятность безотказной работы основной цепи (или элемента) ТС в течение времени $(t-\tau)$; $a_m(\tau)$ – частота отказов резервированной ТС кратности m в момент времени τ .

Расчетно-логические схемы общего и отдельного резервирования замещением представлены на рис. (1.9 а) и (1.9 б).

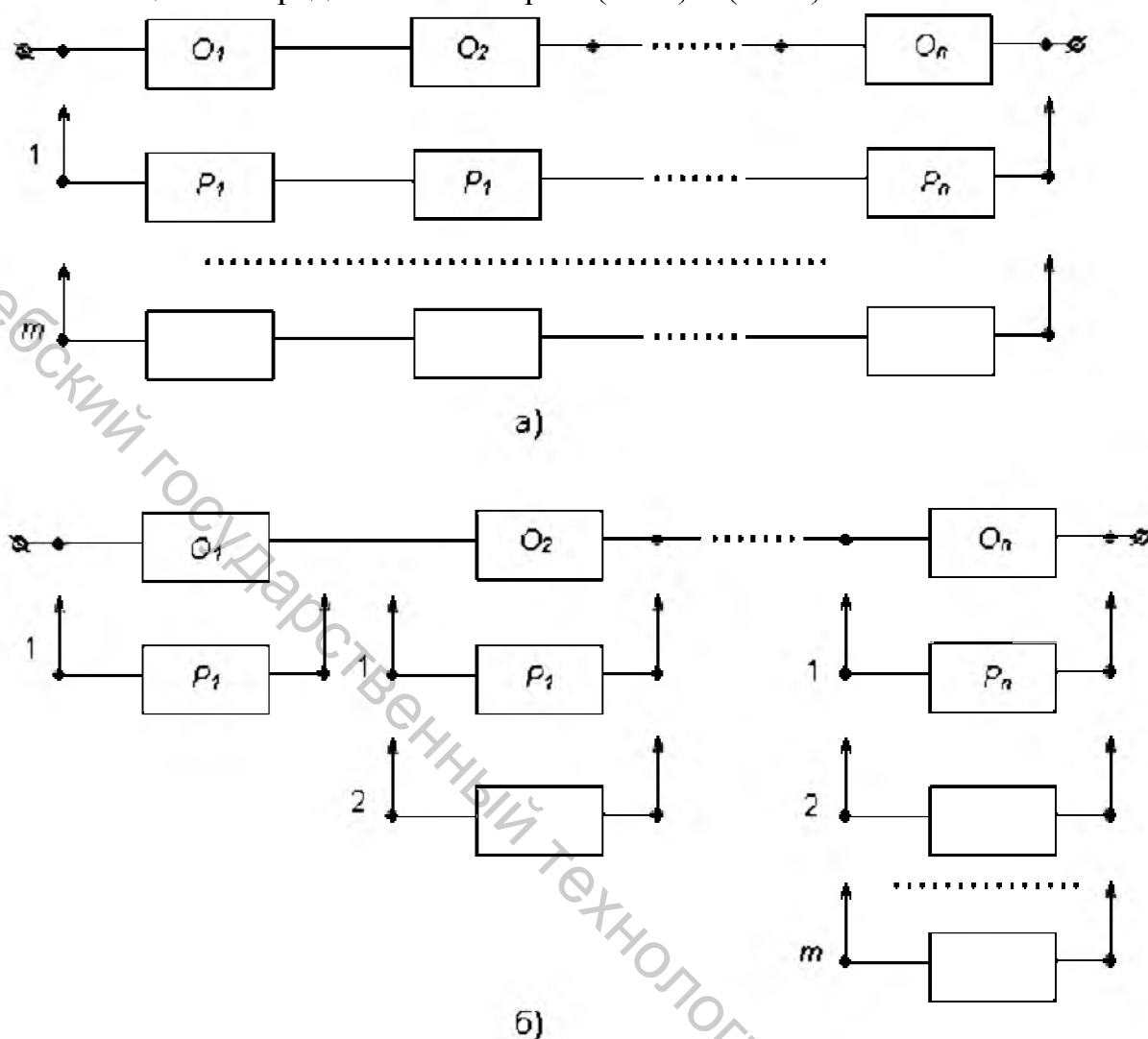


Рисунок 1.9 – Резервирование замещением:
а – общее; б – отдельное

При общем резервировании замещением и нагруженном резерве (рис. 1.9 а) для подсчета $P_{TC}(t)$ обычно используют выражения для схем общего резервирования.

При ненагруженном резерве и экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы вероятность $P_{TC}(t)$ и средняя наработка T_{TCcp} определяются из следующих выражений:

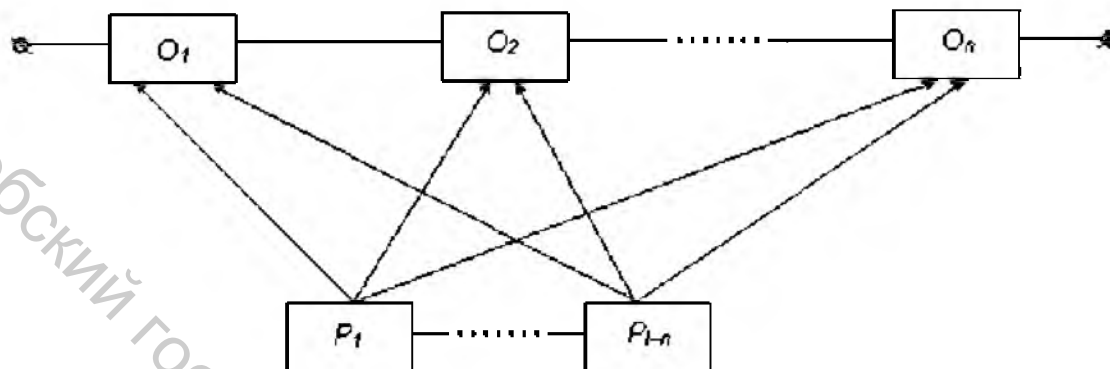
$$P_{TC}(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!};$$

$$T_{TCcp} = T_{cp0} (m + 1),$$

где λ_0 , T_{cp0} – интенсивность отказов и средняя наработка до отказа основной цепи ТС.

5.4 Резервирование с дробной кратностью

Расчетно-логическая схема для такого типа резервирования при нагруженном резерве приведена на рис. 1.10.



а)

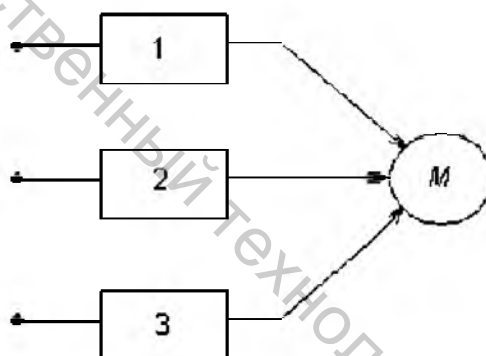


Рисунок 1.10 – Резервирование замещением:
а – с дробной кратностью; б – мажоритарное

Резервированная ТС состоит из n основных однотипных и $(l - n)$ резервных элементов, находящихся в нагруженном резерве ($n > (l - n)$). При отказе одного из основных элементов на его место без перерыва в работе включается один из резервных. Причем резервные элементы также могут отказывать. Таких замещений, не нарушающих работу ТС в целом, может быть не более $(l - n)$.

Вероятность безотказной работы резервированной ТС в течение времени t для данного случая (рис. 1.10 а) определяется из следующего выражения:

$$P_{TC}(t) = \sum_{i=0}^{l-n} C_l^i [1 - P_o(t)]^i \cdot [P_o(t)]^{l-i}$$

Глава 6. НАЗНАЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Назначение показателей надежности для конкретной ТС состоит из следующих этапов:

- выбор основных показателей надежности;
- назначение норм надежности;
- выбор метода контроля показателей надежности.

6.1 Выбор основных показателей надежности

Для определения основных показателей надежности ТС используют следующую методику:

1) Собирают сведения о системе, в которую входит рассматриваемый объект, и последовательно анализируют факторы, влияющие на выбор показателей надежности.

2) Устанавливают назначение объекта. При этом все объекты делятся на три группы:

а) объекты, предназначенные для работы в системах, эффективность которых может быть оценена экономическими показателями;

б) объекты, функционирование которых может быть связано с обеспечением безопасности;

в) объекты, для которых нельзя указать назначение систем, в которых они будут использованы.

3) Объекту, в соответствии с типом группы, назначаются один или несколько показателей надежности.

При назначении показателей надежности систем *первого типа* (по экономическим показателям) для восстанавливаемых объектов, у которых допустимы перерывы в работе, основными показателями надежности являются $T_{ср}$ и $T_{срв}$ или комплексный показатель K_T , который зависит от этих двух показателей.

Для восстанавливаемых объектов, у которых перерывы в работе не допустимы, имеем релейную зависимость функции φ , т. е. полезный эффект может быть получен лишь при БР в течение заданного времени (t_j, t_{j+1}) . Поэтому для таких систем выбирается интервальный показатель надежности – вероятность БР в течение заданного интервала времени.

При назначении показателей надежности систем *второго типа* (из условий безопасности) необходимо выделить основные факторы, влияющие на безопасность. Соответствующие математические модели должны учитывать случайные процессы, протекающие в системе поля появления отказов.

Для *третьей группы* объектов, для которых нельзя указать тип системы, целесообразно назначать одну любую полную характеристику надежности:

1. Для неремонтируемых изделий – функция надежности $P(t)$ или плотность распределения наработки до отказа $\omega(t)$, или интенсивности отказов $\lambda(t)$.

2. Для ремонтируемых изделий, невосстанавливаемых в процессе применения, вычисляются либо вероятность БР $P(t_1, t_2)$ на интервале времени (t_1, t_2) , либо параметр потоков отказов $\Omega(t)$.

3. Для ремонтируемых восстанавливаемых в процессе применения изделий ПН вычисляются в календарном времени.

Для изделий, перерывы в работе которых допустимы, в качестве ПН используется функция готовности $G(t)$.

Для изделий, перерывы в работе которых недопустимы, в качестве ПН используется вероятность БР $P(t_1, t_2)$.

6.2 Назначение норм надежности

После выбора основных показателей надежности необходимо задать определенные значения этих показателей. При этом должны учитываться экономические соображения и возможности производства.

Сначала находятся нормы надежности, соответствующие возможностям производства. Затем они уточняются и выбираются мероприятия по повышению надежности, наиболее выгодные экономически.

При составлении технического задания обосновать количественные нормы (требования) по надежности и другим эксплуатационным свойствам обычно удастся лишь после рассмотрения соответствующих характеристик уже существующих аналогов.

Таким образом, необходимо иметь прототип и учитывать тенденции изменения его характеристик.

Значение норм надежности прототипа необходимо корректировать с учетом следующих факторов:

- технических характеристик проектируемого объекта;
- технического прогресса за время его проектирования и изготовления;
- изменений условий эксплуатации;
- лимитирующих факторов (стоимость, вес, габариты и т. д.);
- значения последствий отказов.

Учет изменений работы. Проектируемый объект и прототип обычно работают в разных условиях. Поэтому необходимо произвести

перерасчет ПН прототипа на условия применения проектируемого объекта.

Для этого находят коэффициент условий применения КУ. Он равен отношению значений ПН рассматриваемого объекта и прототипа.

Учет технического прогресса. Между выпуском объектов, данные о которых по надежности известны, и объектом, который должен быть изготовлен, к моменту его выпуска обычно проходит несколько лет. За это время совершенствуется конструкция и технология изготовления как самих объектов, так и элементов, из которых они изготавливаются. В соответствии с этим изменяются и значения ПН.

Следовательно, при составлении требований по ПН к проектируемым объектам необходимо экстраполировать изменение показателя их надежности вплоть до момента изготовления новых объектов.

Для этого необходимо знать надежность всех выпускаемых ранее аналогичных объектов. Затем строится график, учитывающий технический прогресс по годам (рис. 1.11). По этому графику вычисляется коэффициент КТП, учитывающий технический прогресс. Он равен отношению ПН проектируемого объекта и прототипа.

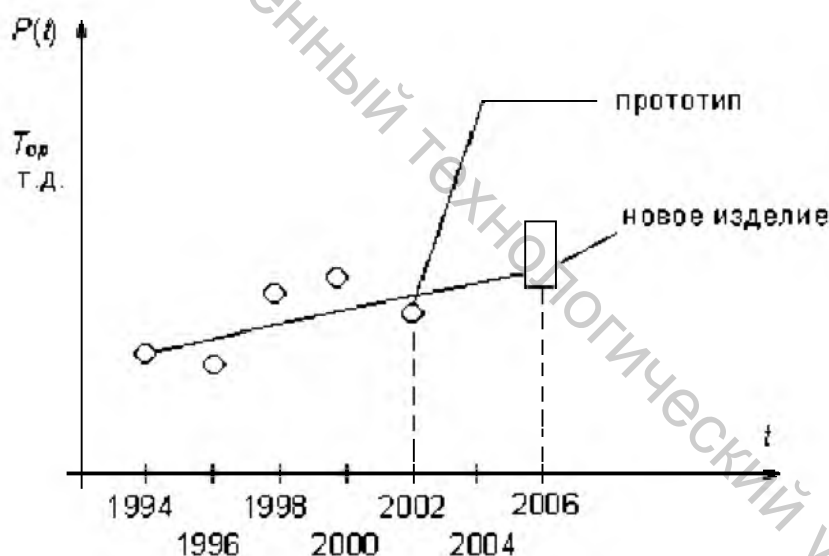


Рисунок 1.11 – Изменение показателя надежности по годам

Для учета технических характеристик проектируемого объекта необходимо сравнить показатели вновь проектируемого объекта с аналогичными показателями существующих объектов с известной надежностью. При этом необходимо иметь зависимости ПН объектов данного типа от основных технических характеристик (чувствительности, мощности и т. д.).

Чтобы получить такие зависимости обычно строят графики. В этих графиках по вертикальной оси откладывают значения ПН, по оси абсцисс – значения исследуемой технической характеристики. Используя такие графики, можно приближенно оценить влияние изменения

технических характеристик объекта на величину показателя (нормы) надежности.

В результате рассмотрения одного или нескольких (при нескольких технических характеристиках) таких графиков может быть найден коэффициент КТ, который учитывает технические характеристики объекта. Этот коэффициент равен отношению ПН проектируемого изделия и прототипа.

6.3 Методы, подтверждающие выполнение норм надежности

Существуют несколько методов, которые подтверждают заданные в технических условиях значения показателей (норм) надежности.

Основными из них являются следующие:

1. Контрольные испытания на надежность.
2. Моделирование отказов на специальных стендах.
3. Вероятностное моделирование на ЭВМ.
4. Контрольные расчеты надежности.

Основным методом, поддерживающим нормы надежности, является *метод контрольных испытаний*.

Перед началом испытаний объекты должны пройти приработку (технологический прогон). При этом в ТУ на объект должна иметься программа испытаний на надежность, которая включает в себя:

- план испытаний;
- требования к средствам испытаний;
- способ обработки, экспериментальных данных и оформление результатов испытаний.

В плане должны содержаться правила, которые устанавливают объем выборки, порядок проведения испытаний и критерии их прекращения.

Моделирование и контрольные расчеты применяются в основном тогда, когда объекты не могут подвергаться контрольным испытаниям. Для осуществления моделирования необходимо знать вероятностные характеристики полуслучайных процессов изменения свойств элементов объекта. Они могут быть получены либо при испытаниях отдельных деталей, либо по данным эксплуатации. Контрольные расчеты надежности обычно проводятся для уникальных объектов. Для этого в основу расчета берут ПН аналогичных элементов объектов и при необходимости экстраполируют эти показатели.

Вероятностное моделирование на ЭВМ проводится в случае, когда контрольные расчеты получаются слишком громоздкими или за счет допущений сильно искажают действительность.

Глава 7. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

7.1 Цели и задачи технической диагностики

Техническая диагностика – наука о распознавании состояния технической системы, изучающая методы получения и оценки диагностической информации, диагностические модели и алгоритмы принятия решений.

Целью технической диагностики является повышение надежности и ресурса технических систем. Техническую диагностику следует рассматривать как раздел общей теории надежности.

Техническая диагностика решает три типа задач:

- задача **диагноза** (задачи по определению состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени). Это *техническая диагностика*;
- задача **прогноза** (от греческого «прогнозис» – предвидеть, предсказывать). Предсказание состояния, в котором окажется объект в будущий момент времени. Это *техническая прогностика*;
- задача **генеза** («генезис» – происхождение, возникновение). Определение состояния, в котором находился объект в некоторый момент времени в прошлом. Это *техническая генетика*.

Решение задач технической диагностики всегда связано с прогнозированием надежности на ближайший период эксплуатации (до следующего технического осмотра). Здесь решения должны основываться на моделях отказов, изучаемых в теории надежности.

Техническая диагностика представляет собой основу технической генетики и технической прогностики, и последние развиваются в тесной взаимосвязи с первой.

Исправное и все неисправные состояния объекта образуют множество его технических состояний. Задачи проверки исправности, проверки работоспособности, проверки правильности функционирования и поиска неисправностей представляют собой частные случаи общей задачи **диагноза технического состояния** объекта.

Диагноз технического состояния объекта осуществляется при помощи тех или иных средств диагноза. Взаимодействующие между собой объект и средства диагноза образуют **систему диагноза**.

Объектами диагноза могут быть любые технические изделия, устройства или системы, относительно которых имеет смысл ставить и решать задачи проверки их исправности, работоспособности, правильности функционирования или задачи поиска неисправностей.

Объект может состоять из **компонент** - функционально или конструктивно выделенных частей. Тогда совокупность компонент объекта, связей между компонентами (внутренних связей) и связей объекта с внешней средой (внешних связей) называют **структурой объекта**.

Взаимодействие объекта с внешней средой осуществляется через его основные и дополнительные входы и выходы. Сигналы на входах и выходах объекта характеризуются параметрами тех физических величин, с помощью которых передаются указанные сигналы. Это – входные и выходные параметры объекта.

Элементарная проверка представляет собой некоторый физический эксперимент над объектом и определяется значением воздействия, подаваемого или поступающего на объект, а также ответом объекта на это воздействие. Значение ответа объекта является результатом элементарной проверки.

Измерение и анализ ответов объекта всегда осуществляются **средствами диагноза**.

В качестве количественных и качественных характеристик технических состояний изделия обычно используются контролируемые параметры с установленными нормативами по допустимому изменению их численных значений.

Под **параметром** в технической диагностике понимают наименование какой-либо физической величины, устанавливаемой для отличия данного состояния от других состояний объекта контроля.

Помимо параметров для оценки технического состояния объектов в технической диагностике используется понятие – **признак состояния**.

Под **признаком состояния** понимают значение (или интервал значений) какого-либо параметра, устанавливаемого для отличия данного состояния от других состояний.

7.2 Показатели технической диагностики

В качестве показателей технической диагностики используются две группы показателей – показатели контролепригодности и показатели диагностирования.

7.2.1 Показатели контролепригодности

Контролепригодность – свойство изделия обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Контролепригодность обеспечивается конструкцией изделия и принятой системой технической диагностики.

- **коэффициент полноты проверки исправности** (работоспособности, функционирования)

$$K_{пп} = \lambda_k / \lambda_o,$$

где λ_k – суммарная интенсивность отказов проверяемых составных частей изделия;

λ_o – суммарная интенсивность отказов всех составных частей изделия;

- **коэффициент глубины поиска дефекта** (повреждения)

$$K_{гп} = F / R,$$

где F – число составных частей изделия, с точностью до которых определяется место дефекта;

R – общее число составных частей изделия, с точностью до которых требуется определение места дефекта;

- **среднее время подготовки изделия к диагностированию заданным числом специалистов**

$$T_B = T_{усл} + T_{мдр},$$

где $T_{усл}$ – среднее время установки и снятия измерительных устройств, необходимых для диагностирования;

$T_{мдр}$ – среднее время монтажно-демонтажных работ на изделии, необходимых для подготовки к диагностированию (вскрытие люков, разъемов, снятие блоков и т. д.);

- **средние трудозатраты на подготовку изделия к диагностированию**

$$Q_B = Q_{усл} + Q_{мдр},$$

где $Q_{усл}$ – средние трудозатраты на установку и снятие измерительных устройств, необходимых для диагностирования;

$Q_{мдр}$ – средние трудозатраты на монтажно-демонтажные работы на изделии, необходимые для подготовки к диагностированию (вскрытие люков, разъемов, снятие блоков и т. д.);

- **коэффициент избыточности изделия**

$$K_{ии} = \frac{G_{и} - G_{иид}}{G_{и}},$$

где $G_{и}$ – масса составных частей, введенных в конструкцию для диагностирования изделия;

$G_{иид}$ – масса всего изделия;

- **коэффициент использования специальных средств диагностирования**

$$K_{ис} = \frac{G_{сд} - G_{ссд}}{G_{сд}},$$

где $G_{сд}$ – суммарная масса серийных и специальных средств диагностирования изделия;

$G_{ссд}$ – масса специальных средств диагностирования изделия;

– **коэффициент трудозатрат на подготовку к диагностированию**

$$K_{тд} = \frac{Q_{д} + Q_{в}}{Q_{д}},$$

где $Q_{д}$ – средние трудозатраты на диагностирование изделия;

$Q_{в}$ – средние трудозатраты на подготовку изделия к диагностированию;

– **дифференциальная оценка контролепригодности**

$$g_i = K_i / K_{иб},$$

где K_i – значение i -го показателя ремонтпригодности (любого из указанных выше) рассматриваемого изделия;

$K_{иб}$ – значение i -го показателя ремонтпригодности (любого из указанных выше) базового (эталонного) изделия;

– **комплексная оценка контролепригодности**

$$g = \prod_{i=1}^n (a_i \cdot g_i),$$

где n – количество показателей контролепригодности рассматриваемого изделия;

g_i – i -ая дифференциальная оценка контролепригодности;

a_i – коэффициент весомости i -го показателя контролепригодности.

7.2.2 Показатели диагностирования

Стандартом устанавливаются следующие показатели диагностирования:

– **вероятность ошибки диагностирования P_{ij}**

$$P_{ij} = P_{oi} \cdot \sum_{l=1}^k P_{cl} \cdot P_{ylil},$$

где k – количество технических состояний (далее – состояний) средства диагностирования;

P_{oi} – априорная вероятность нахождения объекта диагностирования в состоянии i ;

P_{cl} – априорная вероятность нахождения средства диагностирования в состоянии l ;

P_{yji} – условная вероятность того, что в результате диагностирования объект диагностирования признается находящимся в состоянии j при условии, что он находится в состоянии i и средство диагностирования находится в состоянии l ;

- **вероятность правильного диагностирования (достоверность контроля) D .**

Вероятность правильного диагностирования часто называют достоверностью контроля и считают основным показателем диагностирования.

Достоверность контроля – это показатель степени объективного отображения результатами контроля действительного технического состояния изделия.

Вероятность правильного диагностирования (достоверность контроля) D вычисляют по формуле

$$D = \sum_{i=1}^m P_{ij},$$

где P_{ij} – вероятность ошибки диагностирования вида (i, j) ;

m – число возможных технических состояний объекта диагностирования (для систем диагностирования, определяющих работоспособное и неработоспособное состояния объекта в целом $m = 2$).

- **апостериорная вероятность ошибки диагностирования P_{aij}**

$$P_{aij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^m P_{ij}} = \frac{P_{ij}}{D},$$

- **средняя оперативная продолжительность диагностирования T_D**

$$T_D = \sum_{i=1}^m T_{oi} \cdot P_i,$$

где T_{oi} – средняя оперативная продолжительность диагностирования объекта, находящегося в состоянии i . Величина T_{oi} включает продолжительность выполнения как вспомогательных операций, так и собственно диагностирования;

P_i – априорная вероятность нахождения объекта диагностирования в состоянии i ;

- **средние оперативные трудозатраты на диагностирование Q_D**

$$Q_D = \sum_{i=1}^m Q_{Odi} \cdot P_i,$$

где Q_{Odi} – средние оперативные трудозатраты на диагностирование объекта, находящегося в состоянии i ;

– **средняя стоимость диагностирования C_D**

$$C_D = \sum_{i=1}^m C_{oi} \cdot P_i,$$

где C_{oi} – средняя стоимость диагностирования объекта, находящегося в состоянии i . Величина C_i включает амортизационные затраты диагностирования, затраты на эксплуатацию системы диагностирования и стоимость износа объекта диагностирования при его диагностировании.

7.3 Виды технической диагностики

По характеру воздействия на исследуемый объект различают два вида диагностики — *тестовую* и *функциональную*.

Тестовая диагностика основана на подаче стимулирующих воздействий на объект (рис. 1.12). При диагностировании системами управления и ЭВМ в заданные точки схемы подаются электрические сигналы, а затем регистрируются и анализируются отклики (ответы) на них, программное обеспечение для этих целей создается при разработке систем управления, и потребитель получает пакет диагностических программ.

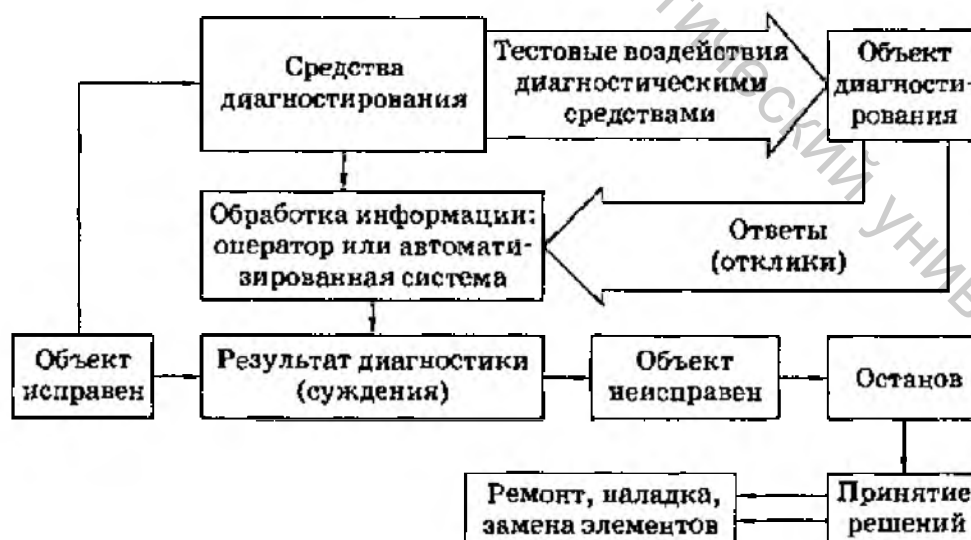


Рисунок 1.12 – Схема тестовой диагностики

При тестовой диагностике воздействия на объект вырабатываются диагностическими средствами.

Системы тестовой диагностики используют для любых видов контроля: исправности, работоспособности, функционирования, поиска неисправностей. Обычно тестовую диагностику применяют, когда объект не используется по своему прямому назначению.

При **функциональной диагностике** подачу воздействий на объект от диагностических средств не производят, а используют только рабочие воздействия собственно объекта, предусмотренные алгоритмом его функционирования (рис. 1.13).

Системы функциональной диагностики применяют, как правило, для контроля функционирования и поиска неисправностей и используют в режиме имитации функционирования объекта. При этом, естественно, имитируются рабочие воздействия. Это наиболее распространенный случай при ремонте и наладке. Например, при настройке телевизоров используют генератор телевизионного сигнала, имитирующий рабочий сигнал.

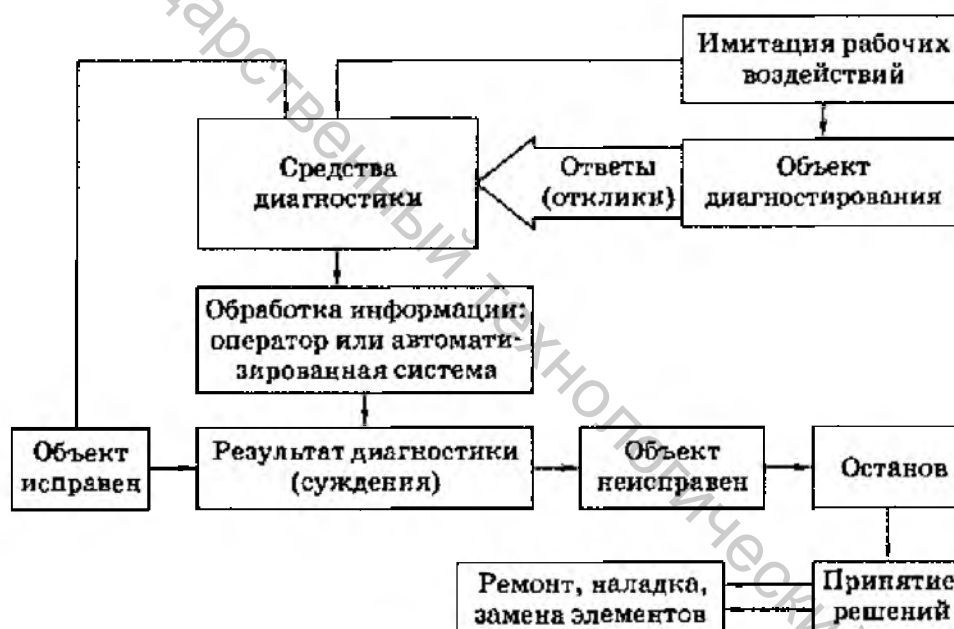


Рисунок 1.13 – Схема функциональной диагностики

Результатом ТД являются «суждения». Для формирования диагноза типа «объект исправен», «объект неисправен», «в объекте неисправен такой-то элемент» необходима обработка ответов на воздействия, т. е. сигналов в контрольных точках. В простейшем случае такая обработка заключается в сравнении значений сигналов с допустимыми, эталонными значениями. Функции обработки могут быть возложены на оператора или на автоматизированные измерительно-вычислительные средства.

В зависимости от условий диагностики выделяют два вида диагностики машин — *предэксплуатационную* и *эксплуатационную*.

Предэксплуатационная диагностика проводится на стадии проектирования опытных образцов или отработки уникальных машин. При этом определяется выполнение требований технического задания, выявляются возможности расширения области работоспособных состояний и улучшения рабочих характеристик, а в случае необходимости уточняется техническая документация.

Предварительно с помощью средств диагностирования проверяется качество обкатки и осуществляется более точная регулировка машин, включая системы управления, что облегчает выявление других дефектов. При определении области работоспособных состояний обычно используют опыт эксплуатации машин аналогичной конструкции.

Применение диагностики при испытании опытного образца машины связано, как правило, с созданием специальных испытательно-диагностических комплексов, с помощью которых машина подвергается комплексным испытаниям с применением методов тестового диагностирования, автоматизированных методов управления процессом испытания и обработки данных, а также диагностирования с применением методов моделирования и прогнозирования.

Эксплуатационная диагностика связана с тем, что имеется широкий диапазон условий и режимов эксплуатации, а начальные показатели качества машины вариативны и приводят к значительной дисперсии в скоростях потери работоспособности и, соответственно, времени достижения машиной предельного состояния.

Средства диагностики должны быть удобны для применения в заводских условиях, обеспечивать диагностирование в минимальное время, обладать достоверностью показаний, осуществлять контроль без разборки и нарушений работы механизмов. Конструкция машины должна быть приспособлена для нужд автоматизированной диагностики либо иметь встроенные приборы, оценивающие ее параметры.

При разработке системы диагностирования сложного ТО применяют встроенные или внешние системы.

Внешние системы диагностики могут быть мобильными и стационарными. *Мобильные внешние системы* предназначены для контроля параметров и диагностирования объектов при приемосдаточных испытаниях, при эксплуатации (для уточнения диагноза) и после проведения ремонтных работ.

Стационарные внешние системы (стенды) используют преимущественно для исследования и испытания объектов в процессе их создания.

Глава 8. МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

8.1 Метод Байеса

Метод Байеса применяют для определения состояния технической системы, характеризующейся набором признаков состояния.

Данными для расчета состояний ТС по методу Байеса являются набор диагнозов D_i и признаков состояния k_j , встречающихся в данной технической системе, а также статистические данные о нахождении ТС в определенном признаке при определенном диагнозе.

Обобщенная формула Байеса записывается следующим образом

$$P(D_i / k_j) = P(D_i) \frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)},$$

где $P(D_i / k_j)$ – вероятность диагноза D_i после того, как стало известно наличие у рассматриваемого объекта признака k_j (апостериорная вероятность диагноза);

$P(D_i)$ – вероятность диагноза D_i , определяемая по статистическим данным аналогичных испытаний. Так, если предварительно обследовано N объектов и у N_i объектов имелось состояние D_i , то

$$P(D_i) = N_i / N,$$

где $P(k_j / D_i)$ – вероятность появления признака k_j у объектов с состоянием D_i . Если среди N_i объектов, имеющих диагноз D_i , у N_{ij} проявился признак k_j , то

$$P(k_j / D_i) = \frac{N_{ij}}{N_i}.$$

где $P(k_j)$ – вероятность появления признака k_j во всех объектах независимо от состояния (диагноза) объекта. Пусть из общего числа N объектов признак k_j был обнаружен у N_j объектов, тогда

$$P(k_j) = N_j / N.$$

Обобщенная формула Байеса применяется также в случаях, когда обследование проводится по комплексу признаков K , включающему признаки $k_1, k_2, \dots, k_v$. Каждый из признаков k_j имеет m_j разрядов ($k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{js}, \dots, k_{jm}$). В результате обследования становится известной реализация признака

$$k_j^* = k_{js}$$

и всего комплекса признаков K^* . Индекс * означает конкретное значение (реализацию) признака.

Формула Байеса для комплекса признаков K^* имеет вид

$$P(D_i / K^*) = \frac{P(D_i)P(K^* / D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s)P(K^* / D_s)},$$

где $P(D_i / K^*)$ – вероятность диагноза D_i после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков K ; $P(D_i)$ – предварительная вероятность диагноза D_i (по предшествующей статистике);

$P(K^* / D_i)$ – вероятность появления комплекса признаков K у объектов с состоянием D_i

$$P(K^* / D_i) = P(k_1^* / D_i)P(k_2^* / D_i) \dots P(k_v^* / D_i).$$

Числитель формулы представляет собой вероятность совместного появления i -го диагноза и данной реализации комплекса признаков

$$P(D_i K^*) = P(D_i)P(K^* / D_i).$$

Для определения вероятности диагнозов по методу Байеса необходимо составить диагностическую матрицу (табл. 1.3), которая формируется на основе предварительного статистического материала.

Таблица 1.3 – Диагностическая матрица в методе Байеса

Диагноз D_i	Признак k_j									$P(D_i)$
	k_1			k_2				k_3		
	$P(k_{11} / D_i)$	$P(k_{12} / D_i)$	$P(k_{13} / D_i)$	$P(k_{21} / D_i)$	$P(k_{22} / D_i)$	$P(k_{23} / D_i)$	$P(k_{24} / D_i)$	$P(k_{31} / D_i)$	$P(k_{32} / D_i)$	
D_1	0,8	0,2	0	0,1	0,1	0,6	0,2	0,2	0,8	0,3
D_2	0,1	0,7	0,2	0	0	0,3	0,7	0,1	0,9	0,1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

В этой таблице содержатся вероятности разрядов признаков при различных диагнозах.

Если признаки двухразрядные (простые признаки «да – нет»), то в таблице достаточно указать вероятность появления признака $P(k_j / D_i)$. Вероятность отсутствия признака

$$P(\bar{k}_j / D_i) = 1 - P(k_j / D_i).$$

Однако более удобно использовать единообразную форму, полагая, например, для двухразрядного признака

$$P(k_j / D_i) = P(k_{j1} / D_i),$$

$$P(\bar{k}_j / D_i) = P(k_{j2} / D_i).$$

Сумма вероятностей всех возможных реализаций признака равна единице

$$\sum_{s=1}^{m_j} P(k_{js} / D_i) = 1,$$

где m_j – число разрядов признака k_j .

8.2 Метод последовательного анализа

Метод последовательного анализа применяют для определения состояния технической системы и количества признаков, которые необходимо контролировать для отнесения системы к исправному или неисправному состояниям. Таким образом, в отличие от метода Байеса, число обследований заранее не устанавливается, их проводится столько, сколько необходимо для принятия решения с определенной степенью риска.

В методе последовательного анализа отношения вероятностей (отношения правдоподобия) составляются последовательно. Допустим, что объект K^* имеет признак K_1 , причем он при диагнозе D_2 встречается чаще, чем при диагнозе D_1 . При этом, если

$$\frac{P(K_1 / D_2)}{P(K_1 / D_1)} > A, \text{ то } K^* \in D_2,$$

где A – верхняя граница принятия решения.

В противном случае, когда признак K_1 значительно чаще встречается при диагнозе D_1 , принимается решение

$$\frac{P(K_1 / D_2)}{P(K_1 / D_1)} < B, \text{ то } K^* \in D_1,$$

где B – нижняя граница принятия решения.

$$B < \frac{P(K_1 / D_2)}{P(K_1 / D_1)} < A.$$

Отношение вероятностей называют отношением правдоподобия.

Если в результате первой проверки данное условие выполняется, то необходима следующая проверка, тогда отношение правдоподобия:

$$B < \frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} \cdot \frac{P(K_2/D_2)}{P(K_2/D_1)} < A.$$

Расчеты повторяются до тех пор, пока значение отношения не выйдет за одну из указанных границ (A или B). Границы рассчитывают, исходя из вероятностей ошибок первого α и второго β рода, которые считаются заданными:

$$\frac{1 - \beta}{\alpha} \geq A, \quad B \geq \frac{\beta}{1 - \alpha}.$$

В практических расчетах можно принимать $\alpha = \beta = 0,05 \dots 0,1$.

8.3 Метод минимального риска

В этом методе решение о принадлежности технической системы к одному из ее состояний принимается на основании *решающего правила* с учетом оптимальности выбора тестируемого параметра x . Задача состоит в выборе значения x_0 параметра x таким образом, что при $x > x_0$ следует принимать решение о неисправном состоянии D_2 , а при $x < x_0$ – допускать дальнейшую эксплуатацию (D_1 – исправное состояние). Тогда указанное решающее правило означает:

при $x < x_0$; $x \in D_1$;

при $x > x_0$; $x \in D_2$.

Плотность распределения x для дефектных и исправных дробилок показана на рисунке 1.14.

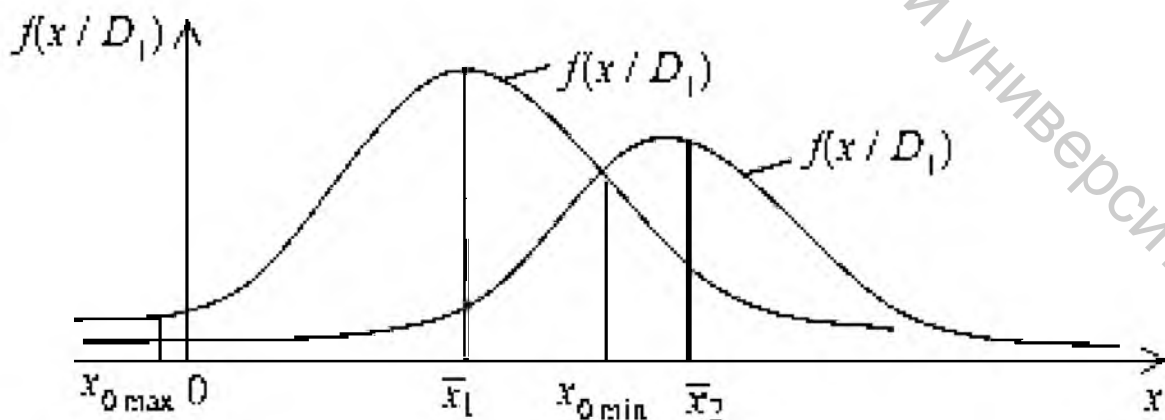


Рисунок 1.14 – Распределение плотности диагностического параметра x для исправного D_1 и дефектного D_2 состояний

Области исправного (D_1) и дефектного (D_2) состояний пересекаются и поэтому принципиально невозможно выбрать значение x_0 , при котором не было бы ошибочных решений. Задача состоит в том, чтобы выбор x_0 был в некотором смысле оптимальным, например, давал бы наименьшее число ошибочных решений.

Возможными ошибками при принятии решений являются: ложная тревога (ошибка первого рода), когда исправный объект признается дефектным (вместо D_1 считают, что имеет место D_2), и пропуска дефекта (ошибка второго рода), когда объект, имеющий дефект признается исправным (вместо D_2 признается D_1).

Обозначим через H_{ij} ($ij = 1, 2$) возможные ошибки, где i – соответствует индексу принятого диагноза, а j – индексу действительного состояния. Тогда H_{12} – это пропуск дефекта, а H_{21} – ложная тревога.

Вероятность ложной тревоги равна вероятности произведения двух событий: наличия исправного состояния и значения $x > x_0$ для исправного состояния:

$$P(H_{21}) = P(D_1) \cdot P(x > x_0 / D_1) = P_1 \cdot \int_{-\infty}^{x_0} f(x / D_1) dx,$$

где $P_1 = P(D_1)$ – априорная вероятность диагноза D_1 (считается известной на основе предварительных статистических данных).

Вероятность пропуска дефекта определяется аналогично:

$$P(H_{12}) = P(D_2) \cdot P(x > x_0 / D_2) = P_2 \cdot \int_{x_0}^{\infty} f(x / D_2) dx.$$

Ошибочное решение складывается из вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска дефекта. Если приписать цены этим ошибкам (C_{21} – стоимость ложной тревоги, а C_{12} – стоимость пропуска дефекта), то получим искомое общее выражение для вычисления среднего риска:

$$R = C_{21} P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x / D_1) dx + C_{12} P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x / D_2) dx.$$

По методу минимального риска принимается следующее решение о состоянии объекта, имеющего данное значение параметра x :

$$\begin{aligned} x \in D_1, \quad \text{если} \quad \frac{f(x_0 / D_1)}{f(x_0 / D_2)} &> \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1}; \\ x \in D_2, \quad \text{если} \quad \frac{f(x_0 / D_1)}{f(x_0 / D_2)} &< \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1}. \end{aligned}$$

С учетом данных граничное значение параметра x_0 находится из формулы

$$\frac{-(x_0 - x_1)^2}{2 \cdot \sigma_1} + \frac{(x_0 - x_2)^2}{2 \cdot \sigma_2} = \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{C_{12}}{C_{21}} \right),$$

где x_1 – номинальное значение параметра x в состоянии D_1 ;

x_2 – номинальное значение параметра x в состоянии D_2 ;

σ_1, σ_2 – дисперсии значений параметров x_1 и x_2 .

8.4 Метод минимального числа ошибочных решений

Метод применяют в задачах надежности, когда стоимость пропуска дефекта и стоимости ложной тревоги примерно равны ($C_{12} \approx C_{21}$), т. е. метод является частным случаем метода минимального риска.

Вероятность ошибочного решения определяется как

$$P_{\text{ош}} = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx + P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2) dx.$$

Минимум вероятности ошибочного решения

$$f(x_0/D_1)/f(x_0/D_2) = P_2/P_1.$$

Решение $x \in D_1$ принимается при

$$f(x/D_1)/f(x/D_2) > P_2/P_1.$$

и $x \in D_2$ при

$$f(x/D_1)/f(x/D_2) < P_2/P_1.$$

8.5 Метод минимакса

Метод **минимакса** предназначен для ситуации, когда отсутствуют предварительные статистические сведения о вероятности диагнозов D_1 и D_2 . Рассматривается «наихудший случай», т. е. наименее благоприятные значения P_1 и P_2 , приводящие к наибольшему значению (максимуму) риска.

Величина риска зависит от x_0 и P_1 (вероятность второго диагноза $P_2 = 1 - P_1$). Из соотношения вытекает, что

$$R(x_0, P_1) = C_{11} P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1) dx + C_{21} P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx + \\ + C_{12} (1 - P_1) \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2) dx + C_{22} (1 - P_1) \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2) dx.$$

Наименее благоприятное значение вероятности исправного P_1^* и неисправного P_2^* состояний

$$P_1^* = \frac{C_{12} - C_{22}}{C_{12} - C_{22} + (C_{21} - C_{11}) f(x_0^*/D_1) / f(x_0^*/D_2)}; \quad P_2^* = 1 - P_1^*.$$

8.6 Метод наибольшего правдоподобия

Метод **наибольшего правдоподобия** можно рассматривать как частный случай метода минимального риска. Правило решения принимается следующим:

$$x \in D_1, \text{ если } \frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} > 1;$$

$$x \in D_2, \text{ если } \frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} < 1,$$

где x – значение параметра для диагностируемого объекта.

Граничное значение находится из условия

$$f(x_0/D_1) = f(x_0/D_2).$$

Часть II

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Качество продукции – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Это определение является общим для различных видов продукции.

В зависимости от вида и назначения продукции ее качество может устанавливаться путем *измерения, испытания, технического контроля* или *технической диагностики*.

Измерение – нахождение физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Контроль (технический контроль) – проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

Техническая диагностика представляет теорию, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы.

Испытание – экспериментальное определение количественных или качественных характеристик продукции в результате воздействия на нее при ее функционировании.

Испытания проводятся на образцах продукции, макетах или моделях, способных заменить продукцию при испытаниях.

Анализ проектирования, изготовления и эксплуатации объектов производства показывает, что можно выделить (четыре) разновидности задач, которые решаются при проведении технологических испытаний изделий:

- 1) выбор оптимального материала деталей конструкций и их комплектующих, конструктивно-геометрических параметров изделий и области его рациональной эксплуатации;
- 2) оптимизация и надежность технологического процесса изготовления изделий;
- 3) проверка соответствия изделий стандартам или технологическим условиям (ТУ);
- 4) контроль качества серийно выпускаемых изделий.

Виды испытаний, их объем, программа испытаний и содержание, в первую очередь, зависят от целей испытаний и типа производства.

Опытные образцы (партии) подвергаются предварительным, а затем приемочным испытаниям.

Предварительные испытания – контрольные испытания опытных образцов продукции с целью определения возможности предъявления ее на приемочные испытания.

Приемочные испытания – испытания, проводимые для контроля качества образцов продукции, а также изделий единичного производства с целью решения вопроса о возможности постановки на производство продукции или передачи ее в эксплуатацию. В процессе приемочных испытаний используемые средства измерений и испытаний подлежат метрологической аттестации.

В зависимости от характера связей между разработчиками, потребителями и изготовителями приемочные испытания опытного образца продукции могут быть ведомственными, межведомственными и государственными.

Ведомственные испытания – испытания, проводимые комиссией, состоящей из представителей заказчика и исполнителя.

Межведомственные испытания – испытания, проводимые комиссией, состоящей из представителей заказчика, исполнителя и представителя заинтересованных ведомств, предприятий и др.

Государственные испытания – испытания, проводимые комиссией или испытательной организацией, которой предоставлено право их проведения для проверки количественных значений выходных характеристик изделия на соответствие требованиям, установленным в стандартах или программе испытаний для данного вида изделий. Государственные испытания обычно проводят на месте установки изделий для эксплуатации. В зависимости от места испытаний они носят названия лабораторных, полигонных, летных, эксплуатационных испытаний.

Продукцию, выпуск которой уже налажен, подвергают приведенным ниже испытаниям.

Периодические испытания – проводят с целью периодического контроля уровня качества выпускаемой продукции. Периодические испытания проводит отдел технического контроля (ОТК) предприятия изготовителя в объеме и сроки, установленные нормативно-технической документацией (НТД), утвержденной руководителем предприятия изготовителя.

Результаты периодических испытаний оформляют протоколом.

Параметрические испытания выполняют с целью соответствия выходных параметров изделия техническим требованиям (ТУ) и конструкторско-технологической документации.

Эти испытания проводят в нормальных условиях: при температуре $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$, влажности $(65 \pm 15)\%$, давлении $(84 \div 106)$ кПа, при отсутствии механических воздействий, радиации и других факторов.

Параметрические испытания могут входить в состав всех видов испытаний: предварительных, приемочных, приемосдаточных, периодических и типовых.

Испытания на надежность проводят для определения значений показателей надежности изделия в заданных условиях.

Ускоренные испытания – испытания продукции, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации в более короткий срок, чем в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации. Сокращение времени испытаний достигается путем повышения уровня воздействующих факторов, в результате чего соответственно возрастает интенсивность отказов изделия.

Исследовательские испытания проводятся для изучения определенных свойств объекта контроля.

Типовые испытания проводят для оценки эффективности и целесообразности внесенных изменений в конструкцию, рецептуру или технологию изготовления продукции. Типовым испытаниям подвергают изделия, прошедшие приемочные испытания. Результаты типовых испытаний оформляют актом приемки изделия, подписанным участниками испытаний и утвержденным руководителем.

Климатические испытания проводят для проверки работоспособности и сохранности внешнего вида изделия в условиях и после воздействия климатических факторов.

Цель проведения испытаний на воздействие климатических факторов, требования к объектам и подготовке испытаний, виды проведения, контроль, измерение, обработка и оформление результатов устанавливает акт, подписанный заинтересованными сторонами.

Электрические испытания проводят при испытании опытных и серийных образцов для проверки электрического сопротивления изоляции.

Механические испытания определяют способность изделия выполнять заданные функции в условиях воздействия механических факторов и после них. Цель проведения испытаний на воздействие механических факторов, виды, требования к объектам, подготовка, проведение, контроль, измерения, обработку и оформление результатов испытаний устанавливает стандарт или ТУ на данное изделие.

Сравнительные испытания – испытания, проведенные в идентичных условиях для сравнения характеристик качества двух или более изделий. Эти испытания позволяют без значительных затрат непрерывно контролировать производственный процесс, выявлять конструктивно-технологические недоработки, непрерывно оценивать эффективность разрабатываемых мероприятий и прогнозировать интенсивность внезапных и постепенных метрологических отказов изделий.

Глава 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТМАСС. ТВЕРДОСТЬ

Общие требования к проведению испытаний механических свойств пластмасс определяет ГОСТ 14359 – 69 «Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования».

Твердость – характеристика материала, зависящая от совокупности его пластических и упругих свойств и характера напряженного состояния, проявляющееся в способности оказывать сопротивление при деформации участка поверхности тела из этого материала.

Международными испытательными центрами рекомендованы к применению пять основных методов испытания твердости пластмасс:

- метод Шора (Durometer Shore Hardness);
- метод Бринелля (Ball Indentation Hardness);
- метод Роквелла (Rockwell Hardness);
- метод IRHD (IRHD Hardness);
- метод Баркола (Barcol Hardness).

Отечественными лабораториями используются ряд региональных уникальных или адаптированных к международным методам испытаний твердости пластмасс:

- метод вдавливания шарика;
- метод Пузея-Джонса.

2.1 Определение твердости по методу Шора

Стандарты испытаний – ISO 868, ASTM D2240, ГОСТ 24621 – 91 «Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору)».

Метод основан на внедрении в испытываемое тело острых инденторов различной формы под действием калиброванной пружины. В зависимости от типа индентора различают твердомеры Шора типов А и D. На рисунке 2.1 приведены формы инденторов для твердомеров типов А и D.

Образцы для испытаний. Толщина стандартного образца для испытаний должна быть не менее 6 мм. Размеры образца должны позволять проводить испытание на расстоянии не менее 12 мм от любого края. Поверхность образца в месте контакта с опорной поверхностью на площади радиусом не менее 6 мм от кончика индентора должна быть очень ровной.

Оборудование. Для измерения твердости по методу Шора используются дюрометры, например, отечественный дюрометр марки 2033ТИР, который позволяет измерять твердость в диапазоне от 0 до 100 единиц по методу Шора А.

Индентор для твердомера типа А

Индентор для твердомера типа D

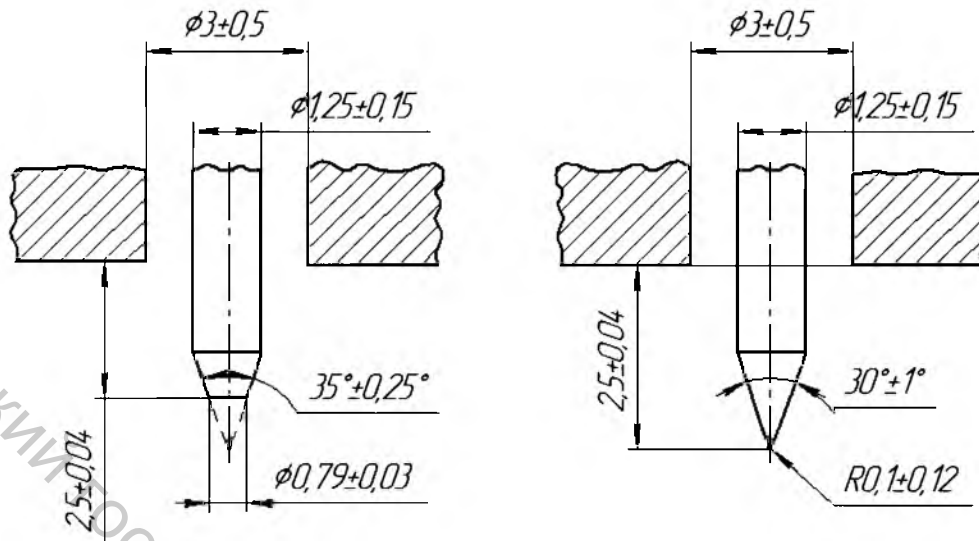


Рисунок 2.1 – Индентор для определения твердости по Шору приборами типа А и D

Показания записываются по следующей форме:

Твердость по Шору А/15:45,

где *A* – тип твердомера, *15* – время в секундах от момента приведения опорной поверхности в тесный контакт с образцом до момента снятия показания, *45* – показания по индикатору твердомера.

Твердость по Шору D/1:60,

где *D* – тип твердомера, *1* – время в секундах от момента приведения опорной поверхности в тесный контакт с образцом до момента снятия показания, *60* – показания по индикатору твердомера.

Рекомендуется использовать прибор типа D в тех случаях, когда твердость материала, измеренная на приборе типа А, превышает 90 единиц. Прибор типа А используют в тех случаях, когда значение твердости, полученное на приборе типа D, менее 20 единиц.

2.2 Определение твердости по методу Бринелля

Стандарты испытаний – ISO 2039-1, DIN 53456.

Метод основан на вдавливании в образец сферического индентора (шарика) в течение 30 с на постоянную глубину $0,3 \pm 0,02$ мм. Во время нагружения производится измерение возникающей нагрузки *P*. Затем в течение 60 секунд нагрузку поддерживают постоянной. Одновременно с этим несколько увеличивается глубина внедрения. После выдержки индентора под постоянной нагрузкой производят измерение глубины отпечатка и силы. Твердость по Бринеллю H_k рассчитывают по формуле

$$H_k = \frac{P}{\pi Dh}, (\text{МПа})$$

где P – максимальная нагрузка, Н; D – диаметр шарика, мм; h – глубина внедрения, мм.

Образцы для испытаний. Толщина стандартного образца для испытаний должна быть не менее 6 мм. Размеры образца должны позволять проводить испытание на расстоянии не менее 12 мм от любого края. Поверхность образца в месте контакта с опорной поверхностью на площади радиусом не менее 6 мм от кончика индентора должна быть очень ровной.

Оборудование. Для измерения твердости по методу Бринелля используют прибор типа ТШСП-500.

2.3 Определение твердости по методу Роквелла

Стандарты испытаний – ISO 2039-2, ASTM D785, ГОСТ 24622 – 91 «Пластмассы. Определение твердости. Твердость по Роквеллу».

Метод основан на вдавливании индентора (полированный закаленный стальной шарик) в образец. Диаметр шарика зависит от применяемой шкалы Роквелла (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Шкалы твердости Роквелла для полимеров

Шкала твердости	Предварительная нагрузка (Н)	Основная нагрузка (Н)	Диаметр шарика (мм)
R	98,07	588,4	12,7
L	98,07	588,4	6,35
M	98,07	980,7	6,35

Образцы для испытаний. Образец должен иметь форму пластины толщиной не менее 6 мм и размерами не менее 10 × 10 мм.

Испытание (в количестве не менее 5) проводят в следующей последовательности:

- в течение 5 секунд прилагают предварительную нагрузку F_0 ;
- устанавливают индикатор глубины вдавливания на ноль;
- прикладывают испытательную нагрузку F_m и через 15 секунд ее снимают;
- через 15 секунд измеряют глубину вдавливания;
- твердость HR определяется по формуле $HR = 130 - e$,

где e – глубина вдавливания после снятия основной нагрузки в еди-

ницах размерности шкалы (0,002 мм).

Числа твердости по Роквеллу должны находиться в пределах от 50 до 115. Значения, выходящие за эти пределы, считаются неточными: измерение необходимо повторить еще раз, используя следующую более жесткую шкалу. Шкалы возрастают по жесткости от R через L до M (с увеличением твердости материала).

2.4 Метод определения твердости в единицах IRHD

Стандарт испытаний – ISO 48, ASTM D1415, ГОСТ 20403 – 75 «Резина. Метод определения твердости в международных единицах (от 30 до 100 IRHD). Определение твердости методами ТШ и ТМ».

Сокращение IRHD расшифровывается как «International Rubber Hardness Degrees».

Метод определения твердости в международных единицах основан на вдавливании в образец сферического индентора. При испытаниях измеряют разность между глубиной погружения шарика в испытуемый образец под действием контактной силы и под действием общей силы.

В соответствии со стандартом ISO 48 метод имеет четыре шкалы твердости (таблица 2.2). В соответствии с ГОСТ 20403 – 75 метод имеет две шкалы твердости – ТШ и ТМ (шкалы N и M).

Таблица 2.2 – Шкалы твердости в единицах IRHD

Шкала твердости	Диаметр шарика (мм)	Предварительная нагрузка (Н)	Основная нагрузка (Н)	Толщина образца h (мм)	Диапазон твердости
N (Normal) – ТШ	2,5	0,37	58,7	4	30 ÷ 95
H (High-Hardness)	1,0	0,37	58,7	4	85 ÷ 100
L (Low-Hardness)	5,0	0,37	58,7	6	10 ÷ 35
M (Micro) – ТМ	0,375	0,0083	0,153	4	30 ÷ 95

Образцы для испытаний. Образец должен иметь форму пластины с размерами не менее $10 \times 10 \times h$ мм.

Испытание (в количестве не менее 5) проводят в следующей последовательности:

- в течение 5 – 8 секунд прилагают предварительную нагрузку F_0 ;

- устанавливают индикатор глубины вдавливания на 100;
- прикладывают испытательную нагрузку F_m и через 30 секунд измеряют число единиц твердости.

2.5 Метод вдавливания шарика

Стандарт испытаний – ГОСТ 4670 – 91 «Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика».

Метод основан на вдавливании шарика под действием заданной нагрузки в поверхность образца для испытаний. Глубина вдавливания измеряется под нагрузкой. Площадь поверхности отпечатка рассчитывается по глубине. Твердость H (Н/мм²) определяется по формуле

$$H = \frac{F_r}{5\pi h_r^2},$$

где h – глубина вдавливания, мм; F_r – уменьшенная нагрузка, Н:

$$F_r = F_m \frac{0,21}{(h - h_r) + 0,21},$$

где h_r – уменьшенная глубина вдавливания, 0,25 мм; F_m – нагрузка на индентор при испытаниях, Н.

Шариковый индентор должен быть изготовлен из закаленной стали и отполирован. Диаметр шарика – $5,0 \pm 0,05$ мм. Предварительная нагрузка F_0 – 9,8 Н. Испытательная нагрузка F_m должна иметь одно из следующих значений: 49, 132, 358, 961 Н.

Образцы для испытаний. Образец должен иметь форму пластины толщиной не менее 4 мм и размерами не менее 10×10 мм.

Испытание (в количестве 10) проводят в следующей последовательности:

- в течение 5 секунд прилагают предварительную нагрузку F_0 ;
- устанавливают индикатор глубины вдавливания на ноль;
- прикладывают испытательную нагрузку F_m в течение 2 – 3 секунд;
- через 30 секунд измеряют глубину вдавливания (должна находиться в пределах 0,15 до 0,35 мм).

Значение H менее 250 Н/мм² округляют до целого числа, а значения более 250 Н/мм² округляют до значений, кратных 10 Н/мм².

Прочность (конструкционная) – это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах установленных норм после воздействия механических факторов.

В зависимости от вида нагрузки различают *статические, динамические испытания* и *испытания при циклических знакопеременных нагрузках*.

Статическими называют испытания, при которых прилагаемая к образцу нагрузка возрастает медленно и плавно. Чаще применяют испытания на *растяжение, сжатие или изгиб*, позволяющие по результатам одного опыта установить несколько важных механических характеристик материала.

Испытания проводят на разрывной машине механического или гидравлического принципа действия. Машины для испытаний снабжены датчиками усилия и перемещения, а также прибором, записывающим диаграмму растяжения (рисунок 2.2).

Диаграмма растяжения представляет собой графическое изображение деформации ε (растяжения) образца испытываемого материала под действием напряжений σ , величина которых является условной

$$\sigma = \frac{P}{F_0},$$

где F_0 – начальная площадь поперечного сечения, мм^2 ; P – усилие деформации, Н .

Характер кривой для металлов и пластмасс имеет схожие зоны – зону упругой деформации (I), зону пластической деформации (II) и зону разрушения.

Для пластмасс может наблюдаться зона хрупкого разрушения (кривая 2) или зона вязкого разрушения (кривая 3). В первом случае пластмассы, как правило, имеют низкие пластические свойства и разрушаются при достижении некоторой максимальной нагрузки (армированные пластики). Вязкое разрушение характерно для термопластичных неармированных пластмасс и сопровождается значительным удлинением образцов.

Напряжение, соответствующее точке a , называют **пределом пропорциональности** ($\sigma_{\text{мп}}$). Обычно определяют условный предел пропорциональности, т. е. напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации с осью напряжений, увеличивается на 50 % своего значения на линейном (упругом) участке.

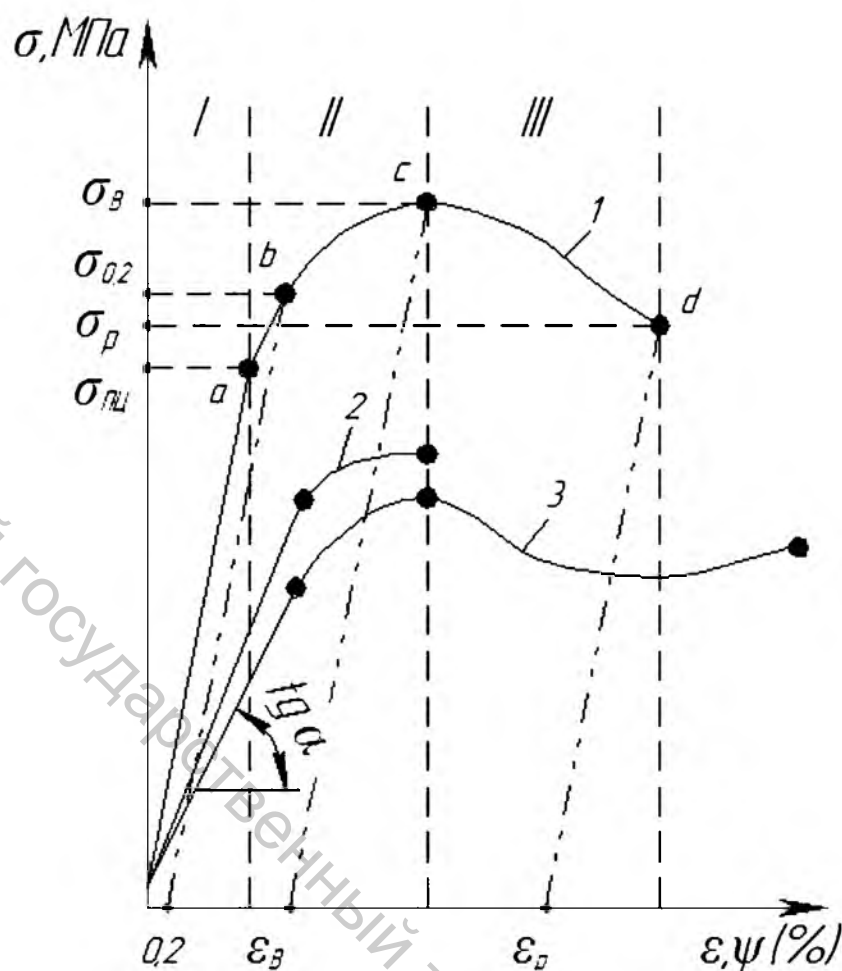


Рисунок 2.2 – Диаграмма растяжения материалов:

1 – металлов для условных напряжений; 2 – хрупких пластмасс без предела текучести; 3 – пластмасс с пределом текучести; I — область упругой деформации; II — область пластической деформации; III — область развития трещин

Предел упругости определяется как напряжение, при котором остаточная деформация достигает 0,05 % (или еще меньше) первоначальной длины образца:

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}.$$

Напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2 %, называют **условным пределом текучести**:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}.$$

По величине $\sigma_{0,2}$ при нормальной температуре различают три класса материалов – низкой прочности (650 МПа), средней прочности (1300 МПа), высокой прочности (1400 МПа).

Напряжение, при котором образец деформируется без увеличения растягивающей нагрузки, называется **физическим пределом текучести**:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}.$$

Напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца, называют **временным сопротивлением, или пределом прочности**:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}.$$

Кроме того, при испытании на растяжение определяют характеристики *пластичности*. К ним относятся **относительное удлинение**

$$\varepsilon = \frac{(l_k - l_0) \cdot 100}{l_0}$$

и **относительное сужение**

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

где l_0 и l_k – длина образца, а F_0 и F_k – площадь поперечного сечения образца до и после разрушения соответственно.

Отношение изменения длины к начальной длине определяет условное удлинение. Отношение в каждый данный момент изменения длины к длине в этот момент дает **истинное удлинение**

$$l_k = l_n \left(\frac{1}{1 - \psi} \right).$$

3.1 Статические испытания на растяжение пластмасс

Стандарт испытаний – ГОСТ 11262 – 80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение».

Метод основан на нагружении испытуемого образца растягивающей возрастающей нагрузкой при установленной скорости деформирования.

Испытания проводят на разрывной машине механического или гидравлического принципа действия. Машины для испытаний снабжены датчиками усилия и перемещения, прибором, записывающим диаграмму растяжения и специальным приспособлением для преобразования растягивающей нагрузки в сжимающую (при отсутствии реверса испытательной машины).

Образцы для испытаний. Для испытания на растяжение пластмасс используют стандартные образцы типов 1 – 3, форма и размеры которых указана на рисунке 2.3.

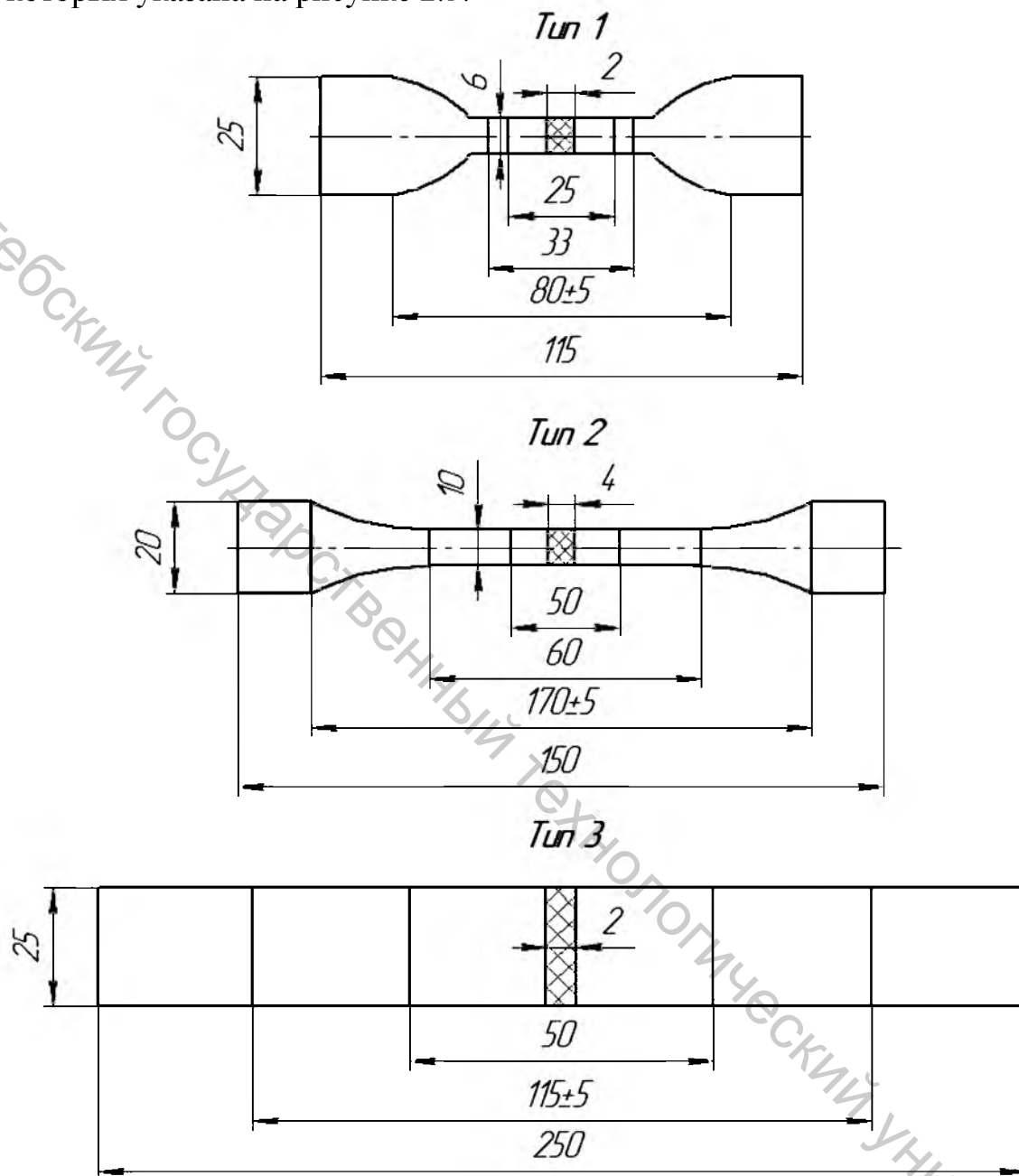


Рисунок 2.3 – Образцы для испытания пластмасс на растяжение

Перед испытанием на образцы наносят необходимые метки в соответствии с рисунком 2.3. Толщину и ширину образцов измеряют в тех местах, в середине и на расстоянии 5 мм от меток. Из полученных значений вычисляют средние арифметические величины, по которым вычисляют начальное поперечное сечение F_0 . Образцы закрепляют в зажимы испытательной машины по меткам.

Устанавливают выбранную скорость испытания и приводят машину в действие, записывая значения определяемых показателей или кривую «нагрузка-деформация» при сжатии.

Модуль упругости – мера жесткости материала, характеризующаяся сопротивлением развитию упругих деформаций.

Методы определения модуля упругости описаны в ГОСТ 9550 – 81 «Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе».

Сущность метода заключается в определении модуля упругости как отношения приращения напряжения к соответствующему приращению соответствующего удлинения.

Испытания проводят при скорости деформации образца 1 % в мин. Нагружение осуществляют до величины относительного удлинения 0,5 %. По диаграмме определяют значение нагрузки, соответствующее величинам относительного удлинения 0,1 % и 0,3 %. Модуль упругости вычисляют по формуле

$$E_p = \frac{(P_2 - P_1) \cdot l_0}{F_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)},$$

где P_2 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3 %, Н; P_1 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,1 %, Н; Δl_2 – удлинение, соответствующее нагрузке P_2 , мм; Δl_1 – удлинение, соответствующее нагрузке P_1 , мм.

3.2 Испытание на сжатие пластмасс

Стандарт испытаний – ГОСТ 4651 – 82 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие».

Метод основан на нагружении испытуемого образца сжимающей возрастающей нагрузкой при установленной скорости деформирования.

Образцы для испытаний. Образцы для испытаний должны иметь форму прямоугольной призмы, прямого цилиндра или прямой трубки.

Для прямоугольной призмы с квадратным или прямоугольным основанием:

$$h = \frac{\lambda}{3,46} \cdot a; \quad h = \frac{\lambda}{3,46} \cdot b.$$

Для прямого цилиндра:

$$h = \frac{\lambda}{4} \cdot 4.$$

Для прямой трубки:

$$h = \frac{\lambda}{4} \cdot \sqrt{D^2 + d_1^2},$$

где a – сторона основания призмы с квадратным основанием, мм; b – меньшая сторона основания призмы с прямоугольным основанием, мм; d – диаметр прямого цилиндра, мм; d_1 – внутренний диаметр трубки, мм; D – наружный диаметр трубки, мм.

Коэффициент гибкости λ равен 10. Толщина образцов 2 – 6 мм. Высота образцов зависит от толщины и может составлять 35, 40, 45 или 50 мм.

Проведение испытаний. Закрепляют образец в зажимах приспособления. Устанавливают выбранную скорость испытания и приводят машину в действие, записывая значения определяемых показателей или кривую «нагрузка-деформация» при сжатии.

3.2 Статические испытания пластмасс на изгиб

Стандарты испытаний – ГОСТ 4648 – 71 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб», ISO 178.

Сущность метода заключается в том, что образец для испытаний, свободно лежащий на двух опорах, кратковременно нагружается в середине между опорами. При этом определяются следующие показатели:

- изгибающее напряжение и значение прогиба в момент разрушения для пластмасс, разрушающихся при заданной величине прогиба или до достижения этой величины;
- изгибающее напряжение при заданном значении прогиба для пластмасс, не разрушающихся при заданной величине прогиба или до достижения этой величины;
- изгибающее напряжение при максимальной нагрузке для пластмасс, у которых при заданной величине прогиба или до достижения этой величины нагрузка проходит через максимум.

Испытания проводят на испытательной машине, обеспечивающей равномерную скорость V относительного движения нагружающего наконечника и опор и позволяющий проводить измерение нагрузки с погрешностью $\pm 1\%$, а прогиба – с погрешностью $\pm 2\%$. Расстояние между опорами должно быть регулируемым.

Испытание может проводиться по двум схемам:

А – при нагружении по трехточечной схеме (рис. 2.4);

Б – при нагружении по четырехточечной схеме (рис. 2.5).

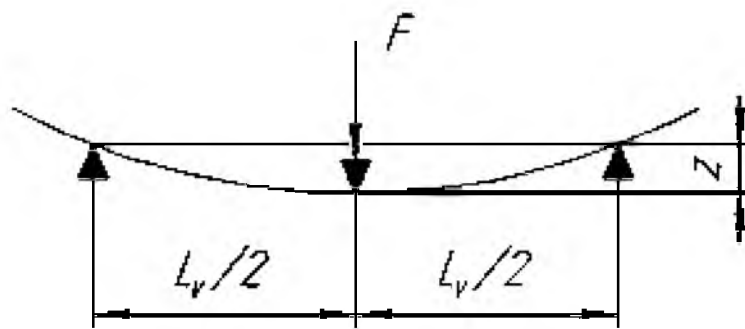


Рисунок 2.4 – Схема нагружения А

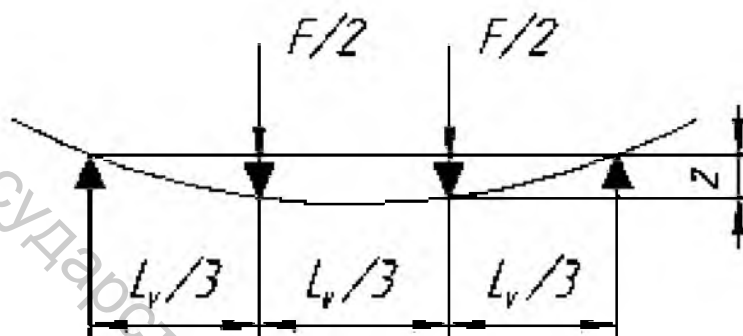


Рисунок 2.5 – Схема нагружения Б

Образцы для испытаний. Стандартный образец для испытаний должен иметь следующие размеры в миллиметрах: длина (L) – не менее 80; ширина (b) – $10 \pm 0,5$; толщина (h) – $4 \pm 0,2$.

Если невозможно изготовить образец с указанными размерами, допускается применять образцы, соотношение длины и толщины которых должно составлять $l \geq 20 h$, а ширина образца должна быть от 10 до 25 мм.

Проведение испытаний. Нагружение образца проводят в середине между опорами плавно, без толчков.

Если образец *разрушается* при заданной величине прогиба или до достижения этой величины, то определяют нагрузку и прогиб при разрушении.

Если образец *не разрушается* при заданной величине прогиба или до достижения этой величины, то нагрузку определяют в момент достижения заданного прогиба.

Испытания продолжают до разрушения образца или до достижения заданной максимальной нагрузки, если это предусмотрено в нормативно-технической документации на материал.

Изгибающее напряжение при изгибе z , вычисляют по формуле

$$\sigma_i = \frac{3P \cdot L_v}{2b \cdot h^2} \left(1 + \frac{4z^2}{L_v^2} \right),$$

где P – усилие деформации, Н; L_v – расстояние между опорами, мм.

3.3 Динамические испытания пластмасс на ударную вязкость

Ударная вязкость — способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки.

Обычно оценивается работа до разрушения или разрыва испытуемого образца при ударной нагрузке, отнесённой к площади его сечения в месте приложения нагрузки. Выражается в Дж/м² или в кДж/м².

Различают следующие основные методы испытаний образцов на ударную вязкость:

- испытания по Шарпи (двухопорный изгиб);
- испытания по Изоду (консольный изгиб);
- испытания по Гарднеру;
- ударное растяжение и ударный сдвиг.

4.1 Испытание ударной вязкости по Шарпи

Стандарты испытаний – ГОСТ 4647 – 80 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи», ISO 179.

Сущность метода состоит в разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятникового копра. Концы образца располагают на опорах. Для испытания на ударную вязкость используют маятниковые копры. Кинематическая схема копра представлена на рис. 2.6.

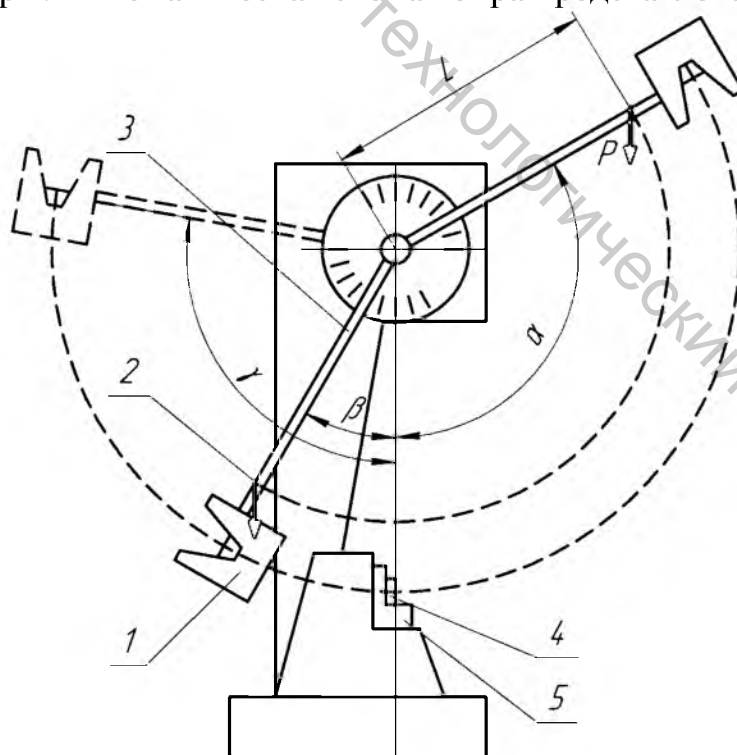


Рисунок 2.6 – Кинематическая схема маятникового копра:

1 – нож; 2 – маятник; 3 – штанга; 4 – образец; 5 – опора

Образцы для испытаний. Для проведения испытаний изготавливают образцы без надреза и с надрезом, типы которых приведены на рисунке 2.7.

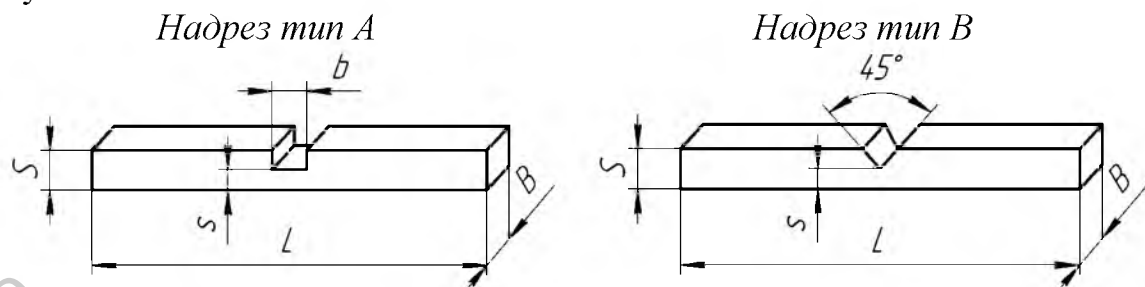


Рисунок 2.7 – Стандартные образцы с надрезом для метода Шарпи

Проведение испытаний. Образец устанавливают горизонтально на опоры копра так, чтобы концентратор располагался симметрично относительно опор. Образец разрушают ударом ножа маятника, который закреплен на штанге и, вращаясь вокруг оси, свободно падает с высоты H , определяемой углом подъема маятника α . Направление удара – поперек образца, со стороны, противоположной надрезу.

Работу, затраченную на разрушение образца (A), определяют как разность запасов энергии маятника до и после удара по формуле

$$A = P \cdot L \cdot \left[(\cos \beta - \cos \alpha) - (\cos \gamma - \cos \alpha) \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \gamma} \right],$$

где P – вес маятника, H ; L – длина маятника, см; α – угол зарядки маятника, град; β – угол взлета маятника после разрушения образца, град; γ – угол взлета маятника при холостом ходе, град.

Ударная вязкость образца вычисляется по формуле

$$a = \frac{A}{B \cdot S} \cdot 10^3, \left(\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2} \right),$$

где A – работа, затраченная на разрушение образца без надреза, Дж; B – ширина образца по его середине или ширина образца по середине надреза, мм; S – толщина образца по его середине, мм.

Относительную ударную вязкость kz в процентах, если это предусмотрено в нормативно-технической документации на материал, вычисляют по формуле

$$kz = \frac{a_k}{a_n},$$

где a_n , a_k – ударные вязкости образцов с надрезом и без надреза.

Глава 4. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Технологические свойства материалов – свойства, определяющие способность подвергаться определенному виду обработки и влияющие на выбор метода переработки.

Технологические свойства пластмасс можно разделить на несколько групп:

- термомеханические (температуры переработки, теплостойкость, морозостойкость);
- теплофизические (тепловое расширение, теплоемкость и т. д.);
- реологические (вязкость, напряжение сдвига, текучесть, таблетированность);
- объемные (объем, дисперсность, влажность, плотность, усадка).

Термомеханические свойства отражают деформационное поведение образца, нагруженного постоянным по величине напряжением, в условиях изменяющейся температуры. К термомеханическим свойствам полимеров относят температуры переработки, теплостойкость и морозостойкость.

4.1 Температуры переработки

Температурный диапазон переработки полимера определяет возможную температуру переработки в зависимости от конструкции изделия и характеристик машины. Эта область температур, где полимер имеет реологические свойства, при которых он легко перерабатывается в изделия, не подвергаясь термодеструкции.

К температурам переработки относятся следующие температуры (критические температуры материала):

- температура размягчения T_p ;
- температура стеклования T_c ;
- температура перехода в высокоэластичное состояние $T_{вэ}$;
- температура начала плавления $T_{нпл}$;
- температура плавления $T_{пл}$.

Данные температуры можно определить с помощью **термомеханического анализа** (ТМА). Термомеханический анализ используют для оценки деформационного поведения в условиях изменяющейся температуры полимерного материала, к образцу которого приложено постоянное по величине напряжение. Полученные числовые зависимости выражаются графиками, построенными в координатах «температура-

деформация». Здесь температура, изменяющаяся с определенной скоростью, является аргументом, а деформация – функцией. Такие зависимости называются *термомеханическими кривыми* (ТМК).

Построение термомеханической кривой может проводиться по двум методикам – при растяжении или сжатии образца. Предпочтение отдается анализу при сжатии образцов, по причине более простого аппаратного обеспечения.

Оборудование. Для оценки термомеханических особенностей пластмасс при сжатии используются следующая аппаратура:

- термостат, с возможностью регулировки скорости нагрева;
- устройство приложения сжимающей нагрузки на базе твердомера;
- индикатор часового типа для определения величины деформации образцов;
- датчик температуры (термопара или ртутный термометр).

Образцы для испытаний. Для испытаний берутся образцы в виде цилиндров диаметром d и высотой $h = (1 \div 1,5)d$ с плоскопараллельными торцами.

Проведение испытаний. Образцы устанавливаются в рабочую камеру термостата и прикладывают некоторое постоянное сжимающее напряжение $\sigma_{ТМК}$.

$$\sigma_{ТМК} = (0,05 \div 0,1) HB.$$

Далее стеклянную дверцу термостата закрывают и регулятором b устанавливают скорость повышения температуры в камере – 1 град/мин . Наблюдение за развитием деформации позволяет построить ТМК исследуемого материала. Для этого полученные данные деформации и температуры откладывают на соответствующих осях системы координат «температура T – деформация ε ». Экспериментальные точки соединяют сплайном и получают ТМК полимерного материала (рисунок 2.8).

Критические температуры позволяют установить области физического состояния аморфного полимера:

- стеклообразное – при $T < T_p$ (участок 1);
- преимущественно стеклообразное – при $T_p < T < T_c$ (участок 2);
- преимущественно высокоэластичное – при $T_{вэ} > T > T_c$ (участок 3);
- высокоэластичное – при $T_{вэ} < T < T_{нпл}$ (участок 4);
- эласто-пластическое – при $T_{нпл} < T < T_{пл}$ (участок 5);
- пластическое (состояние расплава) – при $T > T_{пл}$ (участок 6).

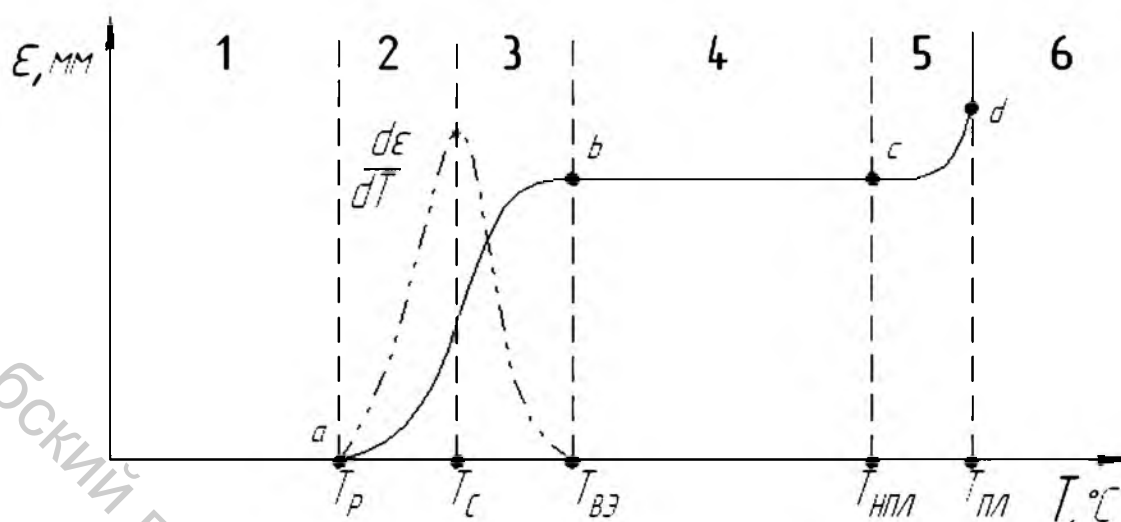


Рисунок 2.8 – Термомеханическая кривая аморфного термопласта

ТМК реактопластов отличаются некоторыми особенностями (рисунок 2.9).

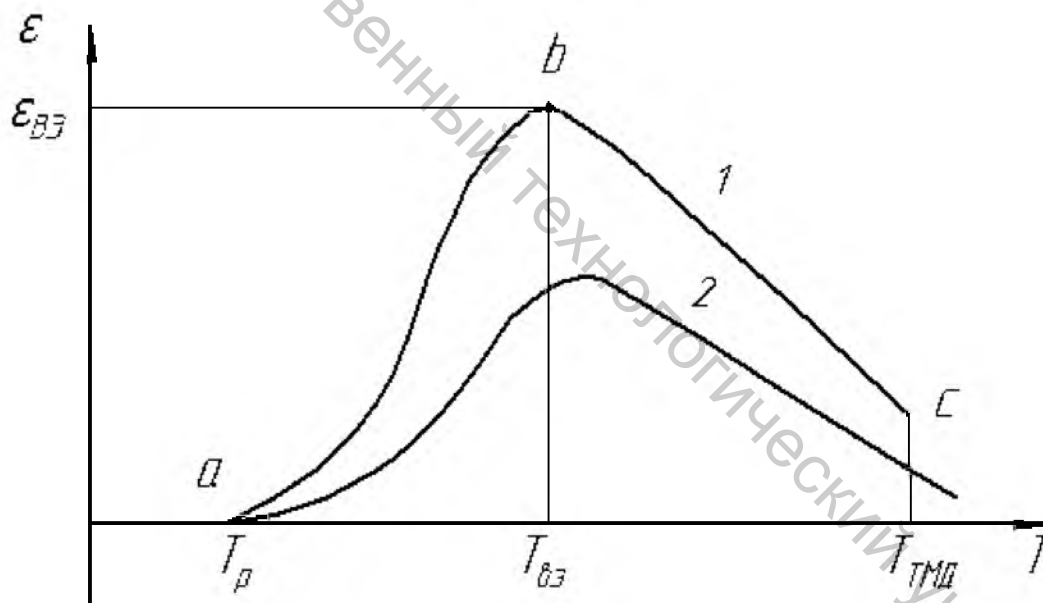


Рисунок 2.9 – ТМК реактопластов:

1 – ненаполненный материал; 2 – дисперсно-наполненный материал

Главные из особенностей – отсутствие традиционного плато после перехода в высокоэластичное состояние ($T > T_{ВЭ}$) и завершение механической кривой не плавлением, а разрушением в результате термомеханической деструкции ($T_{ТМД}$). Отличается и положение участка b-c. Этот участок также имеет прямолинейную форму, но направлен вниз.

4.2 Теплостойкость

Теплостойкость полимеров – это способность сохранять свою форму в пределах допустимых значений при повышенных температурах. Критерием теплостойкости будет являться температура, при которой деформация образца еще отвечает допустимым значениям.

Существуют два метода определения теплостойкости полимеров:

- метод Вика;
- метод Мартенса.

4.2.1 Теплостойкость по Вика

Стандарт испытаний – ГОСТ 15088 – 83 «Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика».

Сущность метода заключается в определении температуры, при которой стандартный индентор под действием силы проникает в испытуемый образец, нагреваемый с постоянной скоростью, на глубину 1 мм, а для ячеистых пластмасс – в определении температуры, при которой образец под действием силы сжимается на 1 мм. Испытания проводят в жидкой среде. Допускается проведение испытаний в воздушной среде.

Образцы для испытания. Для испытания применяют образцы в виде пластины толщиной от 3,0 до 6,4 мм размером испытательной поверхности не менее 10 мм по длине стороны прямоугольника или диаметра круга. Образцы ячеистых пластмасс должны иметь форму параллелепипеда размерами $(20,0 \pm 1,0) \times (20,0 \pm 1,0) \times (10,0 \pm 0,5)$ мм.

Оборудование. Для измерения теплостойкости полимерного материала по Вика применяют следующие приборы и аппаратуру:

- прибор для испытания по Вика (рисунок 2.10);
- жидкостной или воздушный термостат, снабженный регулятором, обеспечивающим равномерное повышение температуры со скоростью $(50 \pm 5) ^\circ\text{C}/\text{ч}$ или $(120 \pm 10) ^\circ\text{C}/\text{ч}$;
- средство для измерения температуры теплопередающей среды, обеспечивающее измерение температуры с погрешностью $\pm 0,5 ^\circ\text{C}$.

Проведение испытаний. Испытуемый образец помещают на самую нижнюю поверхность основания штатива, под индентор незагруженного стержня. Прибор с образцом погружают в теплопередающую среду. Испытание начинают при температуре теплопередающей среды на $50 ^\circ\text{C}$ ниже ожидаемой температуры размягчения. Через 5 мин помещают грузы на несущую пластинку в соответствии со способом испытания и отмечают показание измерительного устройства или устанавливают его на нулевую отметку.

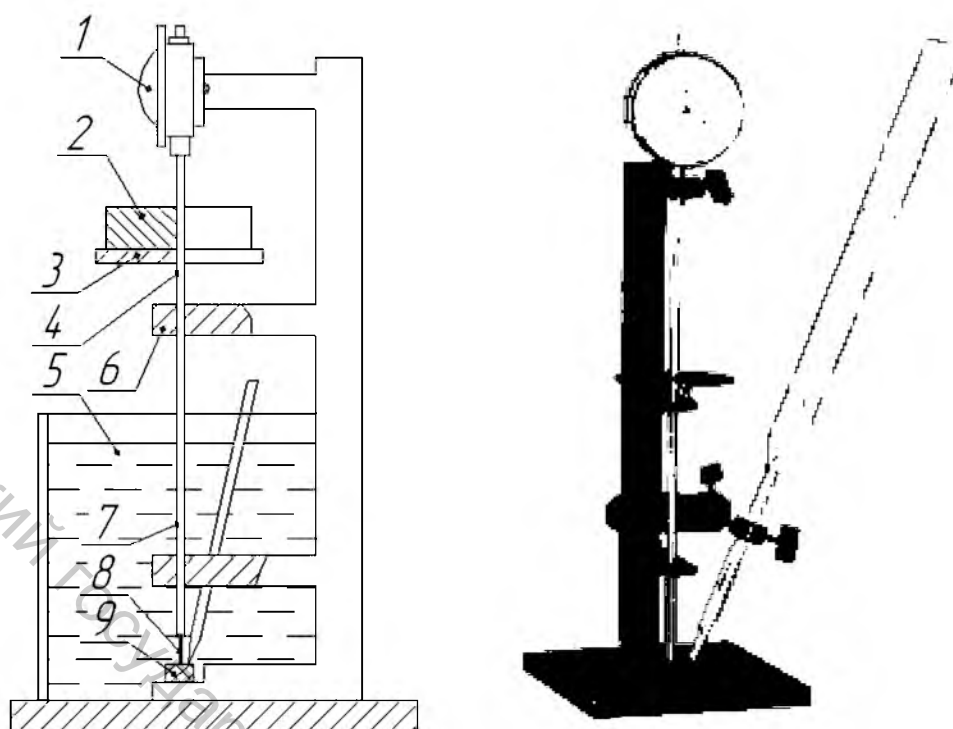


Рисунок 2.10 – Схема и общий вид прибора для испытания теплостойкости по Вика:

1 – измерительное устройство; 2 – груз; 3 – несущая пластина; 4 – металлический стержень; 5 – уровень теплопередающей среды (при испытании в жидкой среде); 6 – направляющие втулки; 7 – термометр; 8 – индентор; 9 – образец

Температуру термостата равномерно повышают со скоростью $(50 \pm 5) ^\circ\text{C}/\text{ч}$ или $(120 \pm 10) ^\circ\text{C}/\text{ч}$, интенсивно перемешивая жидкость в ходе испытания.

Температура, при которой индентор проникает в образец на глубину $(1,00 \pm 0,01) \text{ мм}$, является температурой размягчения (теплостойкостью) по Вика данного образца.

4.2.2 Теплостойкость по Мартенсу

Стандарт испытаний – ГОСТ 21341 – 75 «Пластмассы и эбонит. Метод определения теплостойкости по Мартенсу».

Сущность метода заключается в определении температуры, при которой образец, нагреваемый с постоянной скоростью и находящийся под действием постоянной изгибающей нагрузки, деформируется на заданную величину.

Образцы для испытания. Образцы должны иметь форму брусьев, имеющих размеры, указанные в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Размеры образцов для испытаний на теплостойкость

Вид образца	Длина	Ширина	Толщина
1	120±2	15±0,5	10±0,5
2	80±1	10±0,2	4±0,2
3	50±0,5	6±0,2	4±0,2

Оборудование. Для измерения теплостойкости полимерного материала по Мартенсу применяют следующие приборы и аппаратуру:

- прибор для испытания по Мартенсу (рисунок 2.11);
- воздушный термостат, снабженный регулятором, обеспечивающим равномерное повышение температуры со скоростью $50 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$;
- средство для измерения температуры, обеспечивающее измерение температуры с погрешностью $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- средство для измерения линейных размеров образцов с погрешностью не более 0,1 мм.

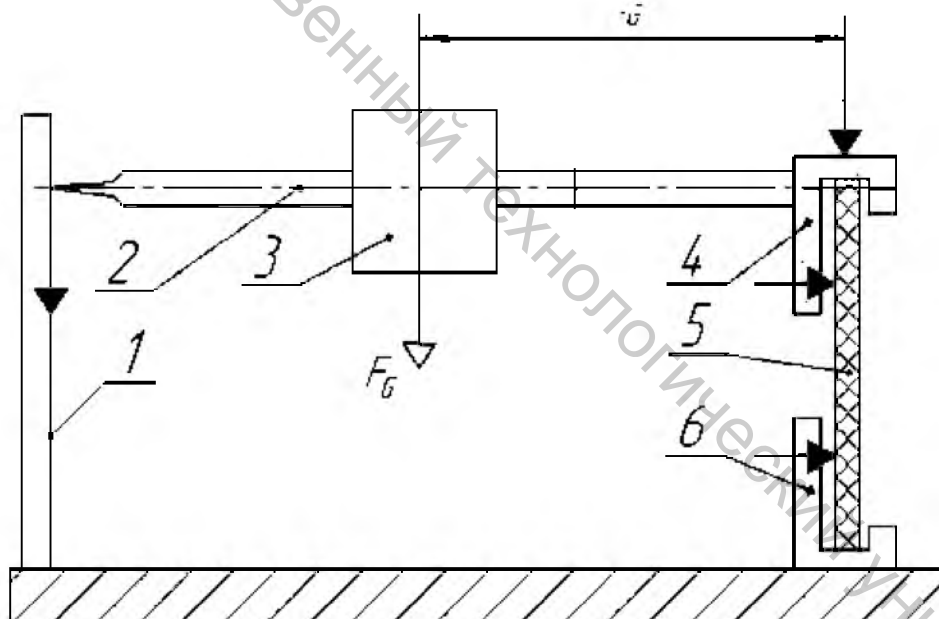


Рисунок 2.11 – Схема прибора для испытания теплостойкости по Мартенсу:

1 – указатель деформации; 2 – рычаг; 3 – перемещаемый груз; 4 – верхняя прижимная головка; 5 – образец; 6 – нижняя зажимная головка

Проведение испытаний. Образцы устанавливают в зажимно-нагрузочное устройство и затем помещают его в термошкаф. Перед началом испытания образец должен находиться в вертикальном положении, а рычаг зажимного устройства — в горизонтальном.

После установки в термошкаф зажимно-нагрузочного устройства с образцами устанавливают термометры и включают обогрев с системой регулирования температуры. Температура в термошкафу должна равномерно повышаться на $323 \pm 5K$ ($50 \pm 5^{\circ}C$) за час. Начальная температура испытания $298 \pm 2K$ ($25 \pm 2^{\circ}C$).

В момент, когда деформация достигнет $(6 \pm 0,1)$ мм, отмечают показания двух термометров и вычисляют среднее арифметическое значение двух показаний с округлением до целых градусов. Вычисленная температура является теплостойкостью по Мартенсу для данного образца.

4.3 Морозостойкость

Морозостойкость – способность находящегося под нагрузкой полимерного образца сохранять свои термодеоформационные свойства при низких температурах.

Ниже температуры морозостойкости пластмасса становится хрупкой и растрескивается, поэтому под морозостойкостью также понимают отсутствие хрупкости и характеризуют температурой хрупкости $T_{хр}$.

Для эластомеров хрупкость наступает при $T < T_c$. Большинство густосетчатых полимеров (реактопластов) склонны к упругому разрушению в стеклообразном состоянии, которое они сохраняют при охлаждении до температуры около $-60^{\circ}C$ ($T_{хр}$ от -30 до $-60^{\circ}C$). Термопласты могут выдерживать без хрупкого разрушения температуры от $-10^{\circ}C$ до $-200^{\circ}C$.

Стандарт испытаний – ГОСТ 22346 – 77 «Пластмассы ячеистые эластичные. Метод определения коэффициента морозостойкости».

Образцы для испытаний. При проведении технологических испытаний на морозостойкость или для определения температуры хрупкости полимерных материалов применяют образцы двух типов:

- в форме пластинок $25 \times 6 \times 2$ мм, закрепленных консольно;
- в виде полосок $40 \times 6 \times 0,5$ мм, изогнутых в форме петли (образец подвергается деформации консольного изгиба или сжатия).

Проведение испытаний. Приборы для оценки морозостойкости позволяют одновременно охлаждать группу образцов в криокамере. На каждом уровне температуры изгибают или сжимают часть образцов из группы. После деформирования подсчитывают количество разрушенных образцов.

Морозостойкостью считается температура, при которой разрушается половина испытываемой группы образцов.

Глава 5. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Параметры, относящиеся к теплофизическим свойствам, условно разделяют на две группы.

Первая группа определяет внешнее поведение полимерного образца при изменении температуры – *тепловое расширение, термостойкость*.

Вторая группа определяет внутреннюю реакцию материала на тепловое воздействие – *теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, теплоусвояемость и тепловое сопротивление*. Интенсивность каждого вида такой реакции определяется соответствующим теплофизическим коэффициентом.

5.1 Измерение теплового расширения

Коэффициент теплового расширения – общее изменение размеров физического тела в функции температуры.

Он подразделяется на коэффициент линейного расширения (КЛР)

$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 \Delta T},$$

и коэффициент объемного расширения

$$\beta = \frac{v - v_0}{v_0 \Delta T},$$

где l_0, v_0 – значение длины или объема образца при начальной температуре измерения; l, v – значения длины или объема образца при конечной температуре измерения; ΔT – разность температур начала и окончания измерения.

Для изотропных тел эти величины связаны между собой следующим соотношением:

$$\beta = 3\alpha.$$

Физическое строение полимера существенно влияет на характер его теплового расширения. При нагревании аморфных полимеров (рис. 2.12, а) объем материала увеличивается пропорционально температуре, однако скорость этого процесса определяется физическим состоянием объекта. По достижении определенной температуры тепловое расширение возрастает. На графической зависимости $V = f(T)$ наблюдается перелом. Соответственно, в точке перелома происходит скачкообразное увеличение значения коэффициента теплового расширения.

Температура, при которой наблюдается это явление, называется

температурой структурного стеклования (T_{cc}). Как правило $T_{cc} > T_c$.

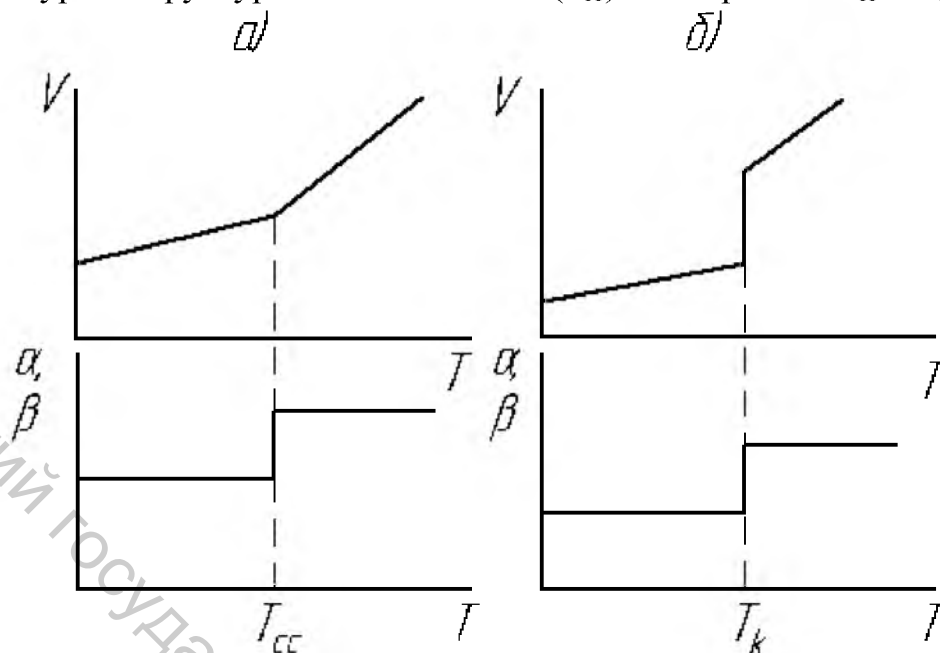


Рисунок 2.12 – Изменение объема (V) и коэффициентов теплового расширения (α , β) полимеров от температуры T :
а — аморфные; б — кристаллизующиеся; в — частично кристаллизующиеся

У кристаллических полимеров при температуре кристаллизации T_k также происходит скачкообразное возрастание скорости теплового расширения (рис. 2.12 б), однако ему соответствует более высокая температура. При нагревании сетчатых полимеров наблюдаются зависимости, сходные с отмечаемыми для аморфных термопластов.

Стандарты испытаний – ГОСТ 15173 – 70 «Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения», ISO 11359-1 (-2).

Сущность метода состоит в испытании образца пластмассы при котором определяют:

- средний коэффициент теплового расширения в минимальном диапазоне температур α_t ;
- средний коэффициент теплового расширения в установленном диапазоне температур α_{tl}^{t2} .

Средний коэффициент линейного теплового расширения характеризует относительное приращение длины образца, вызванное повышением его температуры от нижней до верхней границы интервала, отнесенное к величине этого интервала.

Минимальный интервал температур равен 10 °С, расширение его производят на величины, кратные 10 °С. Размерность величины $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Образцы для испытаний. Образцы цилиндрической формы с

размерами 50×10 или прямоугольной формы с размерами $50 \times 7 \times 7$ мм.

Оборудование. Для определения коэффициентов теплового расширения используют dilatометры. Схема оптико-механического dilatометра представлена на рисунке 2.13.

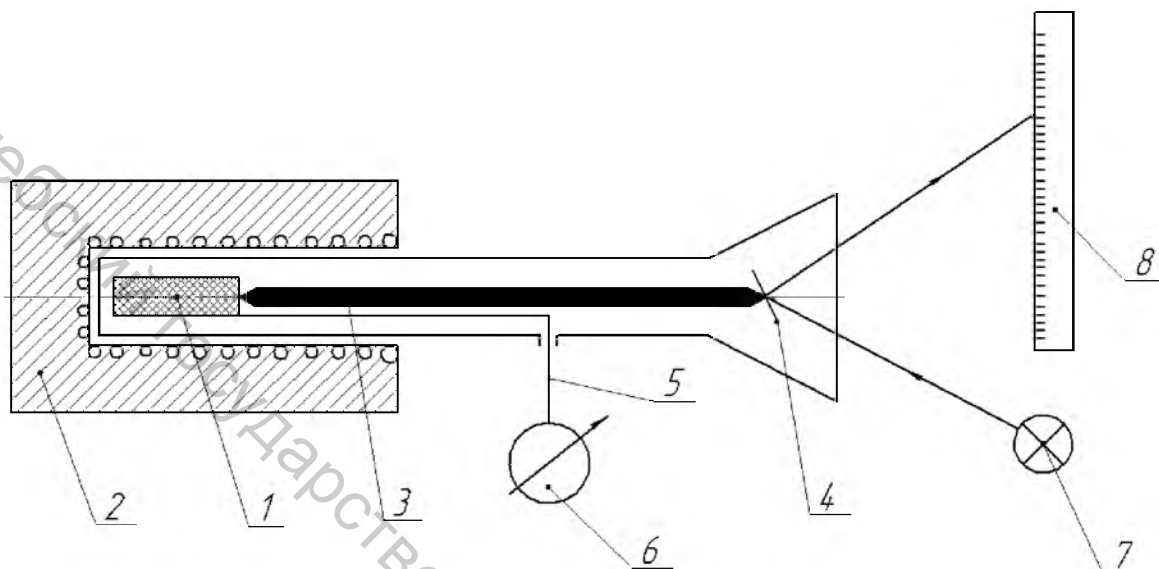


Рисунок 2.13 – Схема dilatометрической установки:

1 – образец; 2 – термокриокамера; 3 – кварцевый стержень; 4 – зеркало; 5 – термопара; 6 – термопара; 7 – лампа; 8 – шкала

Проведение испытаний. Длину образца измеряют с погрешностью не более 0,01 мм в атмосфере 23/50. Образец устанавливают в термокриокамере и вводят в него термопару.

При нестационарном режиме испытаний при достижении в образце температуры не менее чем на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже нижней температурной границы измерения настраивают указатель удлинения на начало измерения и начинают нагрев со скоростью не более $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}$. При стационарном режиме испытания образец термостатируют при температуре t_1 , затем при температуре t_2 и снова при температуре t_1 .

Измерение приращения длины образца производят при температурах, соответствующих границам интервала.

5.2 Испытание термостойкости

Термостойкость – устойчивость полимерного материала к химическому разложению при повышенных температурах.

Для оценки термостойкости используют показатели двух типов:

- время, в течение которого полимер выдерживает заданную температуру без разложения, t_{np} ;
- температура начала разложения, T_0 .

Методы оценки термостойкости основаны на изучении явле-

ний, протекающих при деструкции. Это – изменение свойств полимера (вязкости, массы, прочности), изменение окраски и прозрачности, выделение продуктов деструкции. Основными методами являются *термогравиметрический* и *реологический*.

Термогравиметрический метод. О разложении полимера судят по изменению его массы. Для регистрации изменения массы используют высокочувствительные приборы, называемые дериватографами, главными элементами которых являются прецизионные весы с точностью измерения 0,01 мг и высокоточное нагревательное устройство с программным регулятором температуры.

Термогравиметрию полимеров можно проводить в статическом режиме при заданной постоянной температуре и в динамическом, когда температура изменяется с заданной скоростью.

Термогравиметрический анализ состоит в непрерывном фиксировании изменения массы нагреваемого образца (T_g , кривая потери массы, рис. 2.14).

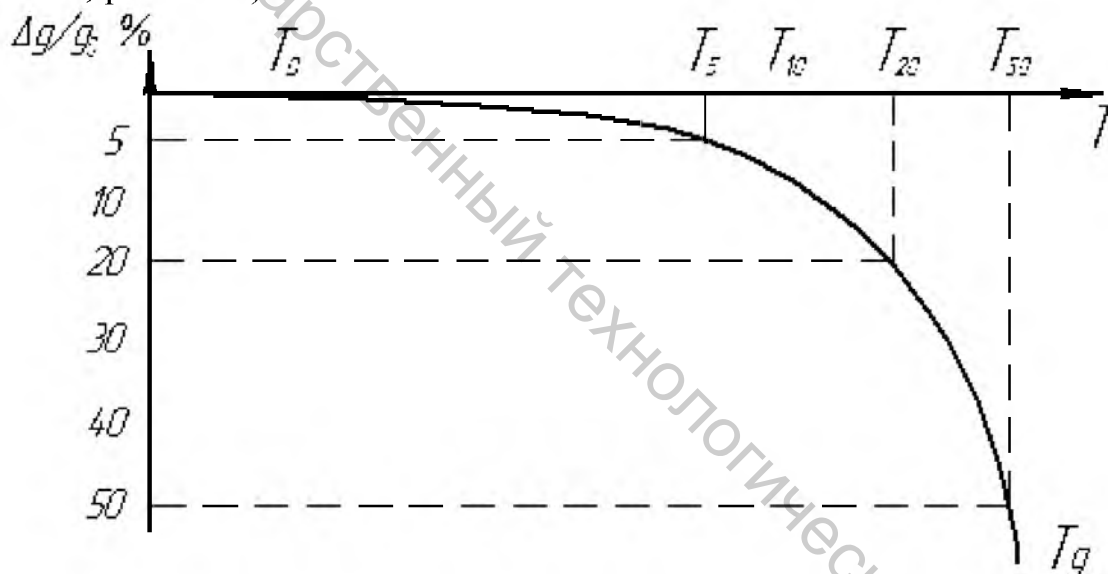


Рисунок 2.14 – Термогравиметрическая кривая полимера

При оценке термостойкости определяют температуры начала потери массы, T_0 , потери массы в количестве 5 %, T_5 ; 10 %, T_{10} ; 20 %, T_{20} ; 50 %, T_{50} .

Реологический метод. Метод заключается в измерении отрезка времени, в течение которого вязкость расплава при заданной температуре остается практически неизменной. Для определения такой зависимости используются вискозиметры. В рабочую камеру прибора, нагретую до заданной температуры, помещают образец и подвергают деформированию с постоянной скоростью сдвига γ . Термостойкость полимера определяется длиной горизонтального участка кривой «касательное напряжение-время».

5.3 Теплофизические коэффициенты

Основными теплофизическими коэффициентами являются следующие величины:

c – удельная теплоемкость;

λ – коэффициент теплопроводности;

α – коэффициент температуропроводности;

Y – теплоусвояемость (тепловая активность);

R – тепловое сопротивление.

Удельная теплоемкость характеризует теплоусвояемость единицы массы m физической системы при нагреве на 1 градус. Размерность удельной теплоемкости – Дж/(кг·К).

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T},$$

где ΔQ – количество тепла, Дж; ΔT – изменение температуры, град.

Стандарт испытаний – ГОСТ 23630.1 – 79 «Пластмассы. Метод определения удельной теплоемкости».

Сущность метода состоит в измерении теплового потока, поглощаемого образцом в процессе монотонного режима нагрева динамического калориметра, характеризуемого временем запаздывания температуры на термометре с известной тепловой проводимостью.

Коэффициент теплопроводности λ численно равен количеству тепла, переносимого через единицу изотермической поверхности за единицу времени при градиенте температуры, равном единице. В системе СИ коэффициент теплопроводности, или, упрощенно, теплопроводность, измеряется в Вт/(м·К).

$$\lambda = \frac{dQ}{dA \cdot \text{grad } T \cdot dt},$$

где dQ – количество тепла, распространяющегося через площадь dA .

Стандарт испытаний – ГОСТ 23630.2 – 79 «Пластмассы. Метод определения теплопроводности».

Сущность метода состоит в измерении теплового сопротивления образца при монотонном режиме нагрева его при заданных значениях температур испытания.

Образец должен быть в форме диска диаметром 15 мм и высотой от 0,5 до 5 мм. Высоту образца выбирают в зависимости от ожидаемого значения коэффициента теплопроводности.

Оборудование. Прибор ИТ-400 (калориметр) и образцовые меры теплопроводности из кварцевого стекла марки КВ.

Проведение испытания. Образец взвешивают с точностью 0,001 г, измеряют высоту и диаметр образца. Образец устанавливают в прибор на тепломер и прижимают его прижимом. Производят нагрев калориметра и через каждые 25 °С измеряют перепады температуры на образце и тепломере.

Коэффициент температуропроводности является физическим параметром, характеризующим теплоинерционные свойства физического объекта. Коэффициент температуропроводности связан с λ следующей зависимостью

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho},$$

где c_p – удельная теплоемкость, Дж/К·кг; ρ – плотность, кг/м³.

Чем больше значение a , тем быстрее происходит выравнивание температуры во всех точках тела. Соответственно, чем ниже величина a , тем лучшим теплоизолятором является материал.

Теплоусвояемость или *тепловая активность* Y характеризует отвод тепла с поверхности внутрь полимерного тела при контактном теплообмене. Ее размерность в системе СИ — Вт·/(м²·К).

Стандарт испытаний – ГОСТ 25609 – 83 «Материалы полимерные рулонные и плиточные для полов. Метод определения показателя теплоусвоения».

Сущность метода заключается в определении плотности потока тепла, проходящего через образец материала в течение заданного времени при постоянной разности температур нагревателя и поверхности образца.

Тепловое сопротивление R характеризует теплоинерционные свойства слоя h конкретного полимера, а также имеет техническое значение, поскольку позволяет оценить тепловое поведение изделия из пластмассы с толщиной стенки h .

Глава 6. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Реологические свойства определяют поведение полимера в эласто-пластическом и пластическом состоянии, а также способность к формообразованию.

6.1 Реологические свойства термопластов

К реологическим свойствам термопластичных полимеров относят – показатель текучести расплава, напряжение сдвига, скорость сдвига, эффективная вязкость, чувствительность расплава к сдвигу.

Текучесть характеризует способность материалов при определенных температурах и давлениях протекать по каналам и заполнять формы.

В качестве характеристик текучести могут быть использованы – кривые течения, длина затекания расплавленного полимера в спиральный канал формы, показатель текучести расплава.

Кривые течения – зависимость напряжения сдвига τ или эффективной вязкости от скорости сдвига γ при определенной температуре.

Длина затекания расплава в спиральный канал – предельная длина проникновения термопласта в литьевую форму с оформляющей полостью в виде заполняемого через центр спирального канала при заданных давлении впрыска, температуре расплава и формы.

Показатель текучести расплава (ПТР) является параметром, во многом определяющим выбор способа переработки термопласта. Метод оценки ПТР стандартизован ГОСТ 11645 – 73 «Метод определения показателя текучести термопластов». Ему соответствует европейский стандарт ISO 1133 – 76, американский ASTM D 1238 – 73 и стандарт Германии DIN 53735.

Сущность метода состоит в определении массы материала в граммах, экструдированного из прибора в течение 10 мин при заданных условиях температуры и давления.

Оборудование. Для оценки значения ПТР используют экструзионный пластомер. Внутри прибора расположена экструзионная камера (рисунок 2.15).

Экструзионная камера 1 представляет собой электрообогреваемый до 400 °С цилиндрический канал диаметром 9,54 мм и длиной 115 мм, внутри которого перемещается полый поршень 2 с направляющей головкой 3. В нижней части экструзионной камеры расположен сменный капилляр с внутренним диаметром 2,095 мм и длиной в 8 мм.

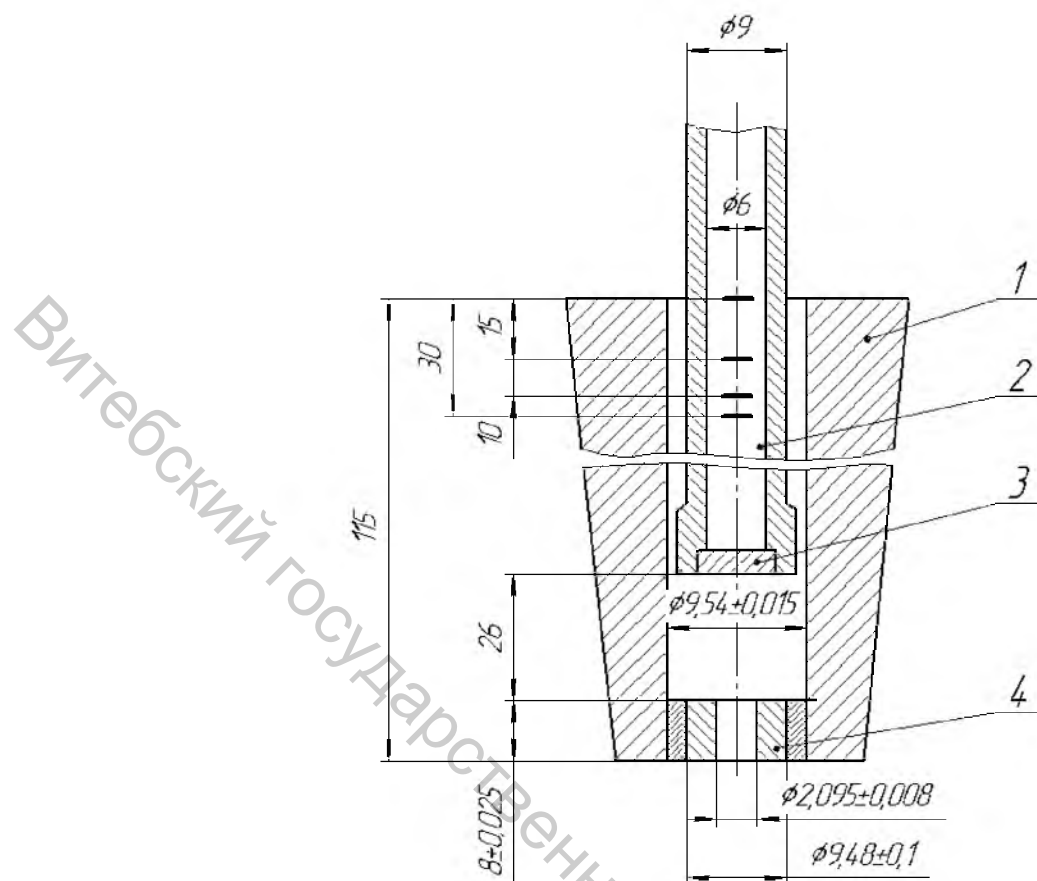


Рисунок 2.15 – Экструзионная камера:

1 – камера; 2 – поршень; 3 – направляющая головка; 4 – капилляр

Образцы применяют в виде гранул, порошков или лент, обеспечивающих их введение в отверстие экструзионной камеры. Порошкообразные материалы предварительно прессуют в таблетки. Масса образца от 4 до 8 г.

Проведение испытания. Образцы кондиционируют, засыпают в полость камеры и уплотняют с целью удаления воздуха. Далее поршень, нагруженный стандартной для испытываемого полимера нагрузкой, опускают в рабочую камеру и всю систему выдерживают при заданной температуре 15 мин. За температуру испытаний принимают температуру термопласта в экструзионной камере на расстоянии 10 мм от верхней поверхности капилляра.

По истечении 15 мин из капилляра вынимают развертку и дают полимеру течь под действием усилия создаваемого грузом и поршнем.

Груз должен обеспечивать нагрузку P , которую вычисляют по формуле

$$P = K \frac{D^2}{d},$$

где K – коэффициент, зависящий от диаметра капилляра и от выбранной нагрузки; D – диаметр направляющей головки поршня, мм; d – диаметр капилляра, мм.

В момент, когда нижняя кольцевая метка штока поршня опустится до верхней кромки экструзионной камеры, весь экструдированный материал срезают и в расчет не принимают.

Измерение ПТР производят до тех пор, пока верхняя метка на поршне не опустится до верхней кромки экструзионной камеры. Для измерения показателя текучести расплава отбирают отрезки экструдированного материала, последовательно отсекаемые через определенные интервалы времени.

Длина отдельных отрезков может быть 10 – 20 мм. После охлаждения полученные отрезки взвешиваются каждый в отдельности с погрешностью не более 0,001 г. Число их должно быть не менее трех. Масса отрезка определяется как среднее арифметическое результата взвешивания всех отрезков.

ПТР определяется по соотношению

$$ПТР_{(T,P)} = \frac{t \cdot m}{\tau}, \text{ (г/10 мин)}$$

где m – средний вес экструдированной массы, г; t – стандартное время испытания (600, 150, 120), с; τ – интервал времени между двумя последовательными отсечениями отрезков, с; T – температура испытания, К; P – нагрузка, Н.

Напряжение сдвига $\sigma_{сдв}$ определяют по соотношению

$$\sigma_{сдв} = \frac{P}{\pi D^2 (l + kr)},$$

где P — нагрузка на поршень, Н; D – диаметр поршня, м; r и l — радиус и длина капилляра, м; k — поправочный коэффициент, учитывающий потерю давления в капилляре.

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ оценивается по уравнению:

$$\dot{\gamma} = \frac{4,5Q}{\pi r^3},$$

где Q – расход полимерной жидкости, см³/с.

Эффективную вязкость при температуре измерений T оценивают по соотношению:

$$\eta_T = \frac{\sigma_{сдв}}{\dot{\gamma}}.$$

Показатель чувствительности расплава к скорости сдвига K_R показывает влияние усилия на поршне на значение ПТР. На приборе изменяют нагрузку на поршень, создаваемую массой груза от 2,16 до 21,6 кг, то есть на один десятичный порядок и измеряют ПТР. Тогда

$$K_R = \frac{ПТР_{21,6}}{ПТР_{2,16}}.$$

Знание данных характеристик полимера помогает в выборе метода переработки. Так, для литья под давлением используют материалы и режимы переработки, при которых текучесть расплава находится в пределах $2 \div 20$ г/10 мин, для выдувного литья в форму – $1,5 \div 7$ г/10 мин, для экструзии труб и профилей – $0,3 \div 1$ г/10 мин, для экструзии пленок – $1 \div 4$ г/10 мин, для ламинатов – $7 \div 12$ г/10 мин.

6.2 Реологические свойства реактопластов

К реологическим свойствам реактопластов относят – текучесть, вязко-пластичные свойства, таблетуемость и др.

Текучесть применительно к пресс-материалам – это способность материала заполнять формующую полость пресс-формы под действием давления. Текучесть зависит от свойств связующего композиции (смолы) и содержания в материале различных компонентов (наполнителей, пластификаторов, смазки).

Стандарт испытаний – ГОСТ 9359 – 80 «Массы прессовочные карбонидо- и меламиноформальдегидные. Технические условия».

По методу Рашига величина текучести определяется по длине стержня, отпрессованного в специальной пресс-форме (рис. 2.16) в стандартных условиях.

Образцы применяют в виде гранул или порошков обеспечивающих их введение в отверстие пресс-формы. Порошкообразные материалы предварительно прессуют в таблетки. Масса образца от 4 до 8 г.

Проведение испытания. Навеску материала массой 7,5 г помещают в камеру пресс-формы, нагретой до температуры переработки испытуемого материала. Формование осуществляется в течение 3 мин при удельном давлении 30 МПа. Длина отпрессованного стержня (в миллиметрах) позволяет оценить пригодность материала для переработки.

Этот показатель текучести, хотя и является относительной величиной, позволяет предварительно установить метод переработки: при текучести по Рашигу 90 – 180 мм применяют литьевое прессование, при текучести 30 – 150 мм – прямое прессование.

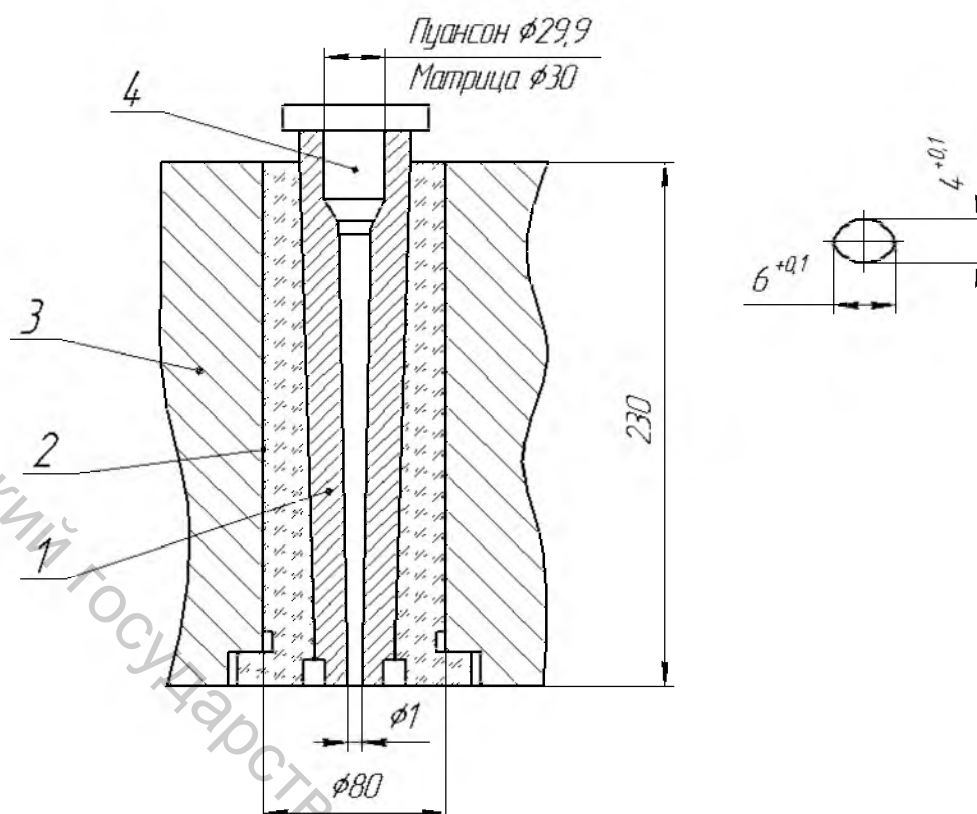


Рисунок 2.16 – Пресс-форма на стержень для определения текучести расплавов:

1 – полуматрица; 2 – стакан матрицы; 3 – обойма матрицы; 4 – пуансон

К вязко-пластичным свойствам полимеров относят коэффициент вязкости, продолжительность вязко-пластичного состояния, время отверждения.

Коэффициент вязкости характеризует сопротивление течению расплава реактопласта при скоростях сдвига, соответствующим условиям деформации.

Продолжительность вязко-пластичного состояния – время, в течение которого реактопласт может находиться в текучем состоянии при заданных условиях.

Время отверждения — это время, необходимое для перехода реактопласта в неплавкое и нерастворимое состояние. Время отверждения зависит от состава и свойств пресс-материала, толщины изделия, предварительного подогрева, подпрессовок и т. д.

Стандарт испытаний – ГОСТ 15882 – 84 «Метод определения пластично-вязких свойств и кинетики отверждения реактопластов».

Сущность метода испытания заключается в формовании образца и определении изменения напряжения сдвига в процессе деформирования, которое происходит в зазоре между двумя коаксиально сферическими поверхностями пресс-формы при заданных значениях скорости сдвига, температуры и давления формования.

Испытания проводят на пластометре в пресс-форме, изображенной на рис. 2.17.

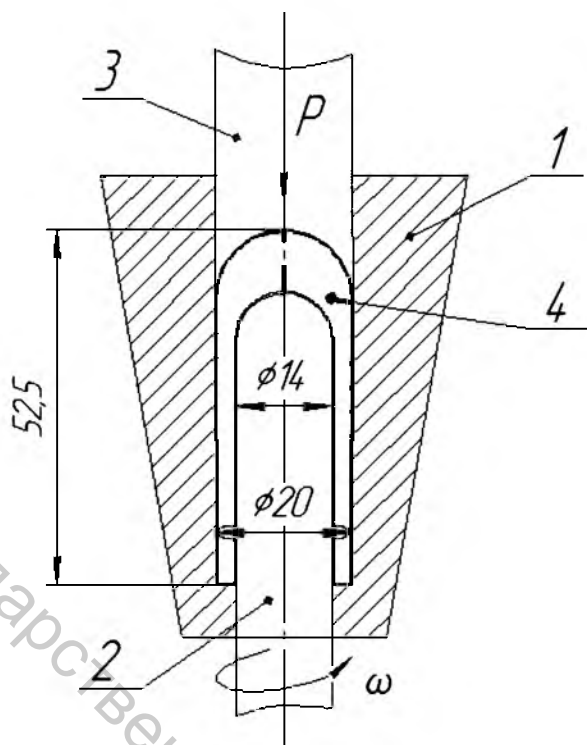


Рисунок 2.17 – Схема пресс-формы пластометра:
1 – матрица; 2 – штырь; 3 – пуансон; 4 – образец

Образцы для испытаний в виде порошка или гранул одной общей пробой массой 200 г.

Проведение испытаний. Навеску загружают в пресс-форму, нагретую до заданной температуры, и опускают пуансон. После смыкания формы включают вращение ротора, при этом автоматически включается запись результатов испытаний на диаграммную бумагу. Пластично-вязкие свойства определяют при непрерывном деформировании при частоте вращения ротора 0,05 об/мин, что соответствует скорости сдвига $0,015 \text{ с}^{-1}$ в зазоре между ротором и матрицей.

Прибор для измерения напряжения сдвига τ в деформируемом образце записывает график изменения τ во времени t (рис. 2.18).

Испытания прекращают, когда после выхода кривой на участок, параллельный оси времени или близкий к нему, наблюдается резкий подъем вверх (точка A). Если продолжить запись кривой $\tau = f(t)$ до точки B, то из этого графика можно далее определить характеристики процесса отверждения.

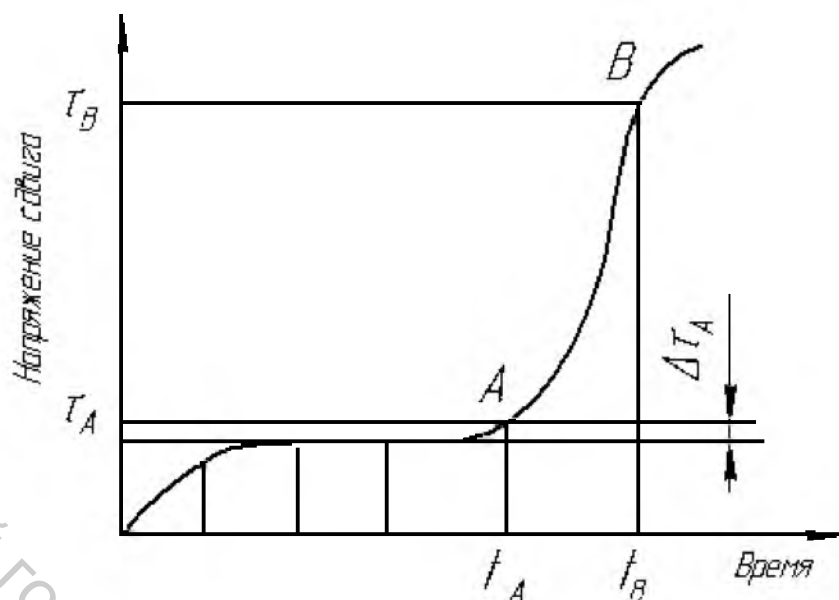


Рисунок 2.18 – Зависимость «напряжение сдвига-время»

Продолжительность вязко-пластичного состояния определяют по графику отрезком $0 — t_A$, соответствующим времени, при котором напряжение сдвига τ_A , характеризующее процесс установившегося течения, повышается на величину 0,03 МПа.

Коэффициент вязкости η (Па·с) вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{\tau_A \cdot 10^6}{\gamma}.$$

Время отверждения при заданном t_B определяют по графику отрезком $0 - \tau_B$, соответствующим времени достижения τ_B .

Время полного отверждения t_{max} соответствует достижению максимального напряжения сдвига τ_{max} .

Таблетированность – способность материала спрессовываться в компактную таблетку под действием сжимающего усилия. Таблетированные реактопласты применяют с целью повысить точность дозирования, уменьшить потери сырья и время нагрева. Таблетки должны быть достаточно прочными, чтобы сохранять свою форму при транспортировке и загрузке в бункер.

Прочность таблетки характеризуют усилием, необходимым для ее разрушения шариком диаметром 5,5 мм. Испытания проводят на ручном прессе с силоизмерительным устройством (динамометром). Приемлемой прочностью обладают таблетки с усилием разрушения 1,2 кН.

Глава 7. ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА

Объемные свойства полимера отражают способность порошкообразного или гранулированного материала к изменению своих объемных характеристик при транспортировке, загрузке в бункер или после формования.

К объемным свойствам полимеров относятся – *плотность, насыпная плотность, удельный объем, насыпная плотность утряски, удельный объем утряски, коэффициент уплотнения, сыпучесть, усадка.*

Плотность (ρ) – одна из основных физических характеристик тела (вещества), равная отношению массы dm малого элемента тела объёмом dV к этому объёму.

Определение плотности проводят в соответствии с ГОСТ 15139 – 69 «Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)».

Для определения плотности (объемной массы) пластмасс в виде листов, пластин, трубок, отливок, гранул или порошков разработано пять методов:

- обмер и взвешивание (по объему и массе);
- гидростатическое взвешивание;
- пикнометрический;
- флотационный (изменением плотности рабочей жидкости);
- метод градиентной колонки.

Метод обмера и взвешивания

Сущность метода заключается в определении плотности вещества по отношению массы образца к его объему, определяемым непосредственно взвешиванием и обмером.

Массу образца определяют взвешиванием на аналитических весах с точностью до 0,0002 г.

Объем образца определяют следующим образом:

- а) правильной геометрической формы — вычисляют по результатам линейных замеров;
- б) неправильной или трудно измеряемой формы — по объему вытесненной жидкости.

Плотность материала ρ_t (г/см³) вычисляют по формуле:

$$\rho_t = \frac{m_1}{V},$$

где m_1 — масса образца в г; V — объем образца при температуре измерения в см^3 .

Метод гидростатического взвешивания

Сущность метода заключается в сравнении масс одинаковых объемов испытуемого вещества и жидкости известной плотности (например, дистиллированной воды), называемой рабочей жидкостью. Метод предназначен для определения плотности (объемной массы) формованных изделий (стержни, бруски, трубки) и обеспечивает точность измерения плотности до 0,1 %. Для испытания применяют образцы весом 0,2 – 5,0 г.

Для проведения гидростатического взвешивания применяют следующие материалы и аппаратуру:

- весы аналитические с точностью взвешивания до 0,0002 г;
- проволока-подвеска (диаметр проволоки 0,06 – 0,04 мм;
- груз массой на 20 % больше массы образца (плотность вещества груза не менее $7,0 \text{ г/см}^3$);
- рабочая жидкость, плотность которой известна.

По данным взвешивания массу жидкости известной плотности $m_{\text{ж}}$, объем которой равен объему образца, вычисляют по формуле:

$$m_{\text{ж}} = m_1 - (m_2 - m_3),$$

где m_1 — масса образца в воздухе, г; m_2 — масса образца с подвеской в жидкости, г; m_3 — масса подвески (с грузом, если он применялся) в жидкости, г.

Плотность испытуемого образца ρ_t (г/см^3) вычисляют по формуле:

$$\rho_t = \frac{m_1}{m_{\text{ж}}} \cdot \rho_{\text{ж}},$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости при температуре измерений, г/см^3 .

Пикнометрический метод

Сущность метода заключается в сравнении масс одинаковых объемов испытуемого вещества к жидкости известной плотности. Метод применяется для определения плотности формованных изделий, пресспорошков, гранул, хлопьев и обеспечивает точность измерения до 0,05 %. Образцы для испытания должны иметь массу от 1 до 5 г.

Для проведения пикнометрического взвешивания применяют сле-

дующие материалы и аппаратуру:

- пикнометр с боковой капиллярной трубкой, вместимостью 50 мл;
- термостат с точностью термостатирования до 0,1 °С в интервале температур от 20 до 30 °С;
- рабочая жидкость, плотность которой известна.

Плотность образца ρ_t (г/см³) вычисляют по формуле:

$$\rho_t = \frac{m_1 \cdot \rho_{ж} - (m_5 - m_4) \cdot 0,0012}{m_1 - (m_5 - m_4)},$$

где m_1 – масса образца в воздухе, г; m_4 – масса пикнометра с рабочей жидкостью, г; m_5 – масса пикнометра с рабочей жидкостью и образцом, г; $\rho_{ж}$ – плотность рабочей жидкости, г/см³.

Флотационный метод

Сущность метода заключается в сравнении плотности образца с плотностью рабочей жидкости в момент перехода образца во взвешенное состояние. Метод применяется для определения плотности пластмасс (преимущественно полиолефинов) в виде гранул и любых формованных изделий. В качестве рабочей жидкости используют смесь этиловый спирт — вода. Метод пригоден для определения плотности полимеров в пределах от 0,9100 до 0,9700 г/см³ с точностью до 0,0002 г/см³.

Метод градиентной колонки

Сущность метода заключается в сравнении глубин погружения испытуемого образца и эталонов плотности в цилиндре с раствором меняющейся по высоте плотности, называемых градиентной колонкой.

Метод применяется для определения плотности пластмасс в виде пленок, гранул, волокон, а также любых формованных изделий. Точность этого метода зависит от перепада плотности в градиентной колонке на 1 мм высоты, называемого чувствительностью колонки. При чувствительности колонки 0,0001 г/см³ на миллиметр точность метода до 0,05 %.

Насыпная плотность и удельный объем выражаются соответственно массой единицы объема (г/см³ или кг/м³) и объемом единицы массы (см³/г или м³/кг) свободно насыпанного материала, они связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью.

Стандарты испытаний – ГОСТ 11035.1 – 93 «Пластмассы. Методы определения насыпной плотности формовочных масс, просыпаемых и не просыпаемых через воронку» или ГОСТ 11035.2 – 93 «Пластмассы. Определение насыпной плотности формовочного материала, который не просыпается через специальную воронку».

Оборудование. Испытание материалов по ГОСТ 11035.1 – 93 проводят на приборе, представленном на рисунке 2.19.

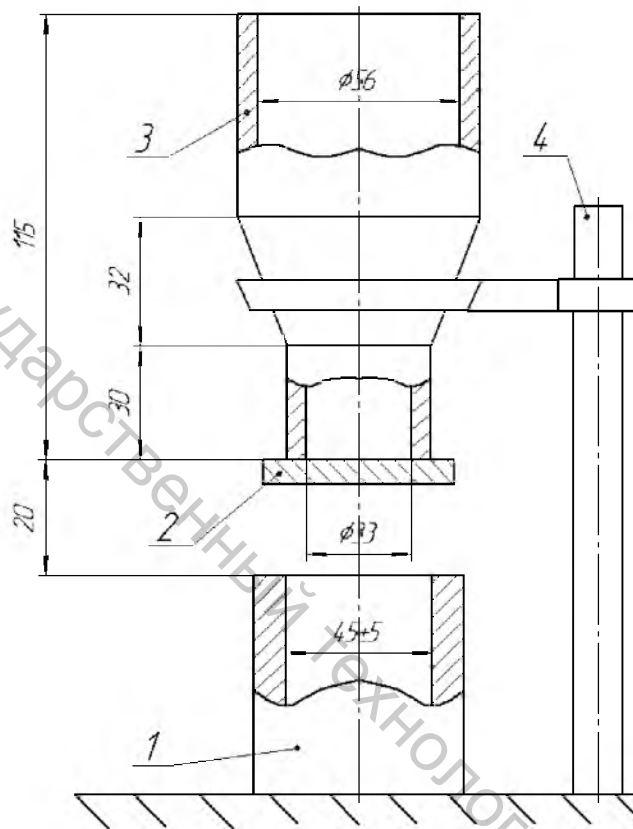


Рисунок 2.19 – Прибор для определения насыпной плотности материалов, просыпаемых через воронку:

1 – измерительный цилиндр; 2 – заслонка; 3 – коническая воронка; 4 – штатив

Проведение испытаний. Закрыв нижнее отверстие воронки, засыпают в нее порцию испытуемого материала $110 - 120 \text{ см}^3$, после чего указанное отверстие вновь открывают и дают материалу высыпаться в измерительный цилиндр. Избыток материала удаляют шпателем с прямыми краями. Затем пробу взвешивают с точностью $\pm 0,1 \text{ г}$.

Насыпную плотность $X_A (\text{г/см}^3)$ рассчитывают по формуле:

$$X_A = \frac{m_2 - m_1}{V},$$

где m_1 – масса пустого измерительного цилиндра, г; m_2 – суммарная масса пробы и измерительного цилиндра, г; V – объем измерительного цилиндра, см^3 .

Удельный объем Y_A (см³/г):

$$Y_A = \frac{V}{m_2 - m_1}.$$

Для измерения насыпной плотности материалов, не просыпаемых через воронку, применяют прибор другой конструкции (рис. 2.20).

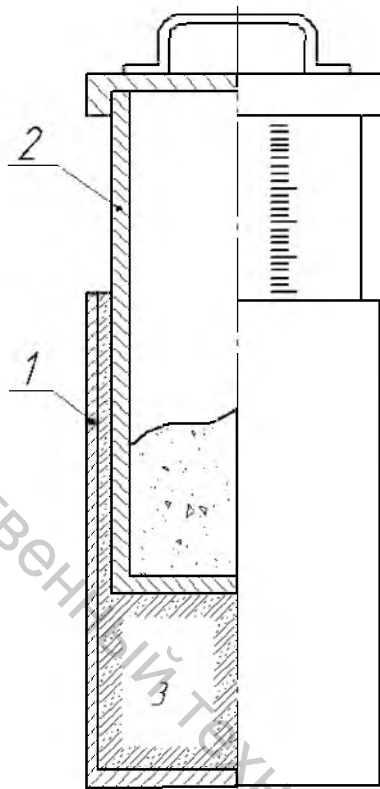


Рисунок 2.20 – Прибор для определения насыпной плотности материалов, не просыпаемых через воронку:

- 1 – поршень, заполненный песком; 2 – измерительный цилиндр;
3 – навеска испытуемого материала

Прибор состоит из стеклянного или металлического измерительного цилиндра 2 с полированной внутренней поверхностью, объемом $1000 \pm 20 \text{ см}^3$, внутренним диаметром $90 \pm 2 \text{ мм}$, и поршня, который представляет собой полый цилиндр массой $2,3 \pm 0,02 \text{ кг}$, неплотно соприкасающийся с измерительным цилиндром.

Проведение испытаний (ГОСТ 11035.2 – 93). Для испытаний берут три пробы массой по $60 \pm 2 \text{ г}$ каждая. Навеску материала небольшими порциями загружают в измерительный цилиндр, после чего в полость цилиндра медленно опускают поршень. Как только поршень достигнет материала, его отпускают и выдерживают в таком положении в течение 1 мин. При этом с помощью шкалы, нанесенной вертикально на наружную поверхность поршня, определяют высоту слоя материала, находящегося в измерительном цилиндре.

Насыпную плотность материала X_B (в $г/см^3$) вычисляют по формуле:

$$X_B = \frac{m}{S \cdot H},$$

где S – площадь внутреннего сечения измерительного цилиндра, $см^2$; m – масса испытуемого материала, $г$; H – высота слоя материала в измерительном цилиндре, $см$.

Удельный объем Y_B ($см^3/г$):

$$Y_B = \frac{S \cdot H}{m}.$$

Насыпная плотность и удельный объем утряски выражаются соответственно массой единицы объема ($г/см^3$ или $кг/м^3$) и объемом единицы массы ($см^3/г$ или $м^3/кг$) уплотненного материала, они связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью.

Насыпную плотность материала X_{YT} ($г/см^3$) вычисляют по формуле:

$$X_{YT} = \frac{m}{S \cdot H},$$

где S – площадь внутреннего сечения измерительного цилиндра, $см^2$; m – масса навески, $г$; H – высота уплотненного материала в измерительном цилиндре, $см$.

Удельный объем Y_{YT} (в $см^3/г$):

$$Y_{YT} = \frac{S \cdot H}{m}.$$

Оборудование. Для определения данных характеристик используется следующая аппаратура: волюметр (или конусная воронка), встряхиватель и цилиндрический стакан объемом $100 см^3$ с вертикальной измерительной шкалой.

Проведение испытаний. Для испытаний берут три пробы материала массой $50 – 60 г$ каждая, взвешенных с точностью $\pm 0,1 г$. Навеску материала через волюметр (или конусную воронку) засыпают в измерительный стакан, который затем прикрепляют к виброплощадке встряхивателя. Утряску материала проводят при частоте $4 – 5 Гц$ и амплитуде $1,5 – 2 мм$ до тех пор, пока не прекратится наблюдаемое визуально уменьшение объема материала.

Коэффициент уплотнения K_{yn} полимерных композиций, применяемых в виде порошков, зерен, гранул и волокнистых материалов, вы-

числяют по формуле:

$$K_{\text{уп}} = \frac{\rho}{X_A},$$

где X_A – насыпная плотность сырья, г/см³; ρ – плотность материала в отформованном изделии, г/см³.

Сыпучесть – способность материала равномерно истекать через отверстие в стенке сосуда. Сыпучесть чаще всего характеризуется временем (в секундах), необходимым для опорожнения металлической воронки с цилиндрическим отверстием определенных размеров, или скоростью (в кг/с) вытекания материала из воронки.

Стандарт испытаний – ГОСТ 25139 – 82 «Пластмассы. Метод определения сыпучести».

Критериями оценки сыпучести порошкообразных и гранулированных полимеров, наряду со временем и скоростью высыпания материала через отверстие конической воронки, могут служить *угол естественного откоса, угол обрушения, угол ссыпания, слеживаемость*.

Время высыпания материала определяют на приборе, представляющем собой конусную воронку с отверстием, перекрываемым заслонкой с длинной ручкой, сферический выступ которой соприкасается с головкой секундомера. Угол конусности воронки составляет 40°. Высота воронки типа А составляет не менее 114 см при диаметре нижнего отверстия $9,5 \pm 0,1$ см; воронка типа В при той же высоте имеет диаметр нижнего отверстия $14,0 \pm 0,1$ см. Тип воронки оговаривается нормативно-технической документацией на конкретный материал.

Порцию порошкообразного или гранулированного материала массой 150 г или объема засыпают в коническую воронку, после чего открывают заслонку и следят за высыпанием материала через канал. После истечения последней порции материала из воронки заслонку закрывают и по показаниям секундомера определяют время высыпания материала в секундах.

При испытании отмечается характер истечения материала. Он обозначается следующими символами: Р – равномерное течение; НР – неравномерное течение; Н – пластмасса не высыпается.

При определении *угла естественного откоса* сыпучий материал свободно насыпают на горизонтальную поверхность в виде конусообразной горки. Угол между образующей и основанием этого конуса называется углом естественного откоса α . Чем выше сыпучесть порошка, тем меньше угол естественного откоса. Угол естественного откоса у порошкообразных и гранулированных полимерных материалов нахо-

дится, как правило, в интервале от 30 до 50°. Угол естественного откоса материалов с хорошей сыпучестью менее 40°.

Для определения α может быть использован любой из двух приборов, изображенных на рис. 2.21.

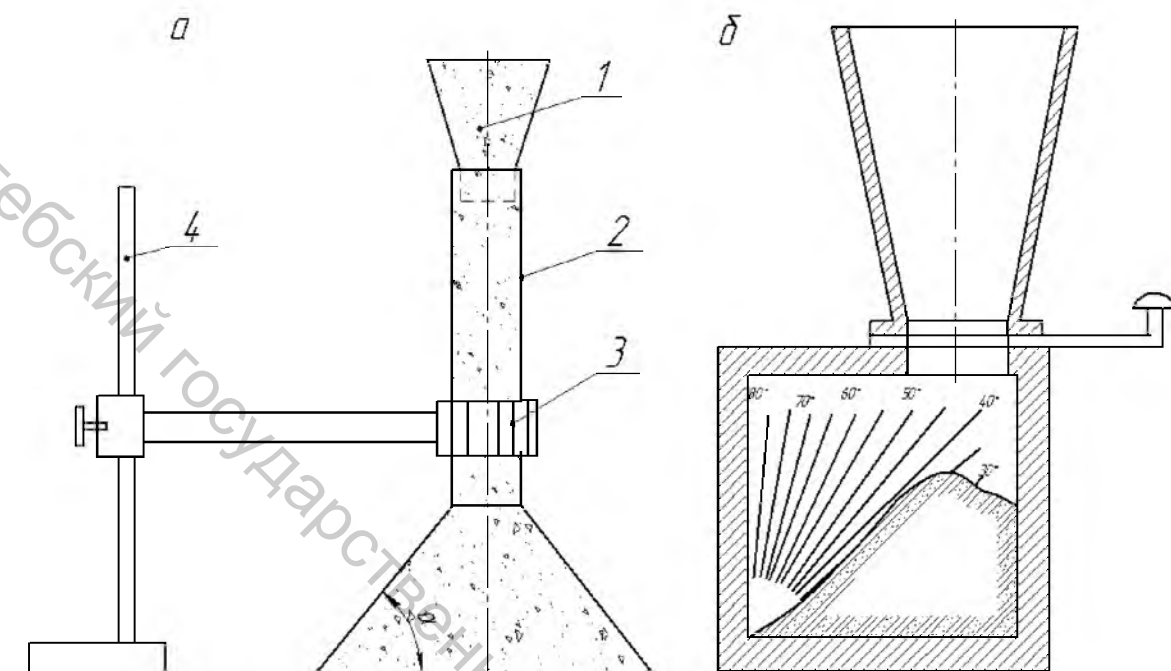


Рисунок 2.21 – Приборы для определения угла естественного откоса:

1 – воронка; 2 – полый цилиндр; 3 – подвижная планка; 4 – штатив с основанием

В процессе испытаний полый цилиндр (диаметр 100 мм, высота 300 мм) совмещают торцевой стороной с окружностью 100 мм на основании прибора, после чего в цилиндр загружают 2 л испытуемого материала. При медленном подъеме цилиндра вверх материал высыпается на горизонтальное основание прибора, принимая форму конуса. Значение угла естественного откоса вычисляют по высоте конуса h_k (найденной по отметке на вертикальной стойке) и диаметру его основания D (определенному с помощью concentric divisions of the base):

$$\alpha = \arctg \frac{h_k}{D}.$$

Основной частью прибора, показанного на рис. 2.21 б, является прямоугольный ящик, передняя и задняя стенки которого выполнены из оргстекла. На передней стенке прибора укрепляют транспортир или наносят угловые деления. Порошок или гранулы засыпают в бункер, оборудованный задвижкой. После открытия задвижки испытуемый материал заполняет нижний правый угол коробки.

Угол естественного откоса определяют визуально с точностью $\pm 1^\circ$ транспортиром или по угловым делениям на стенке прибора.

Углом обрушения β называется угол между горизонтальной плоскостью и образующей конуса, получаемого при самопроизвольном обрушении слоя сыпучего материала через отверстие в горизонтальной плоскости. Чем выше сыпучесть материала, тем меньше угол обрушения. Угол β у порошкообразных и гранулированных полимерных материалов находится обычно в интервале от 50 до 80°.

Угол обрушения определяют на приборе, показанном на рис. 2.22.

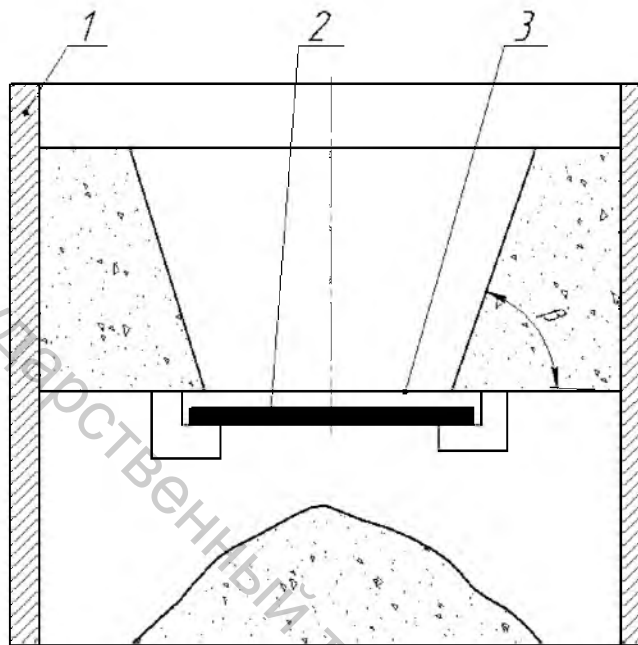


Рисунок 2.22 – Прибор для определения угла обрушения:

1 – стойки короба; 2 – задвижка; 3 — днище

Испытуемый материал свободно засыпают в прямоугольный короб на высоту 100 мм, после чего открывают задвижку и дают материалу свободно обрушиться из круглого отверстия в дне короба. Угол обрушения замеряют угломером.

Углом ссыпания называется угол между горизонтальной поверхностью и наклонной плоскостью, при достижении которого верхний слой материала, находящегося на наклонной плоскости, начинает ссыпаться вниз. Чем больше сыпучесть материала, тем меньше угол ссыпания. Угол ссыпания у большей части порошкообразных и гранулированных полимерных материалов составляет 30 – 50°.

Оценка слеживаемости материалов осуществляется на специальном приборе (конический бункер, оснащенный набором выходных цилиндрических каналов разного диаметра — от 20 до 80 мм). Считается, что материал слеживается, если до хранения в бункере он свободно высыпался через отверстие диаметром 65 мм, а после нахождения в приборе в течение 24 ч образовывал свод. Чем выше сыпучесть материала, тем меньше у него склонность к слеживанию.

Усадку определяют как разность размеров изделия и оформляющей полости формы. Различают усадку объемную (уменьшение объема изделия при его остывании) и линейную (уменьшение линейных размеров при охлаждении изделий).

Стандарт испытаний – ГОСТ 18616 – 80 «Пластмассы. Метод определения усадки».

Для термопластов сущность метода заключается в определении усадки – разности размеров формы и образцов, выраженной в процентах от размеров формы, и анизотропии усадки. Для термореактивных формовочных масс предусмотрено кроме контроля определение дополнительной усадки — разности размеров образцов до и после термообработки и анизотропии дополнительной усадки.

Образцы. Для проведения испытаний используются стандартные образцы в виде брусков размерами $120 \times 15 \times 10$, $120 \times 10 \times 4$, $50 \times 6 \times 4$, $50 \times 50 \times 4$ мм, а также дисков диаметром 100 мм, толщиной 4 и 3 мм и диаметром 50 мм, толщиной 2 мм.

Проведение испытания. Испытания проводят на пяти образцах, полученных последовательными формованиями в одном гнезде формы. Размеры образца и матрицы формы (расстояние между фиксированными точками) устанавливают в направлении, перпендикулярном направлению формования, а для определения анизотропии усадки, дополнительной усадки и ее анизотропии – в перпендикулярном и параллельном направлению формования. Измерения проводят любыми инструментами с точностью до 0,01 мм при $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Усадка (Y) характеризует изменение размеров при формовании изделия и термообработке:

$$Y = \frac{(L_{\phi} - L_u)}{L_{\phi}} \cdot 100;$$

$$Y_d = \frac{(l - l_m)}{L_{\phi}} \cdot 100,$$

где Y_d – дополнительная усадка после термообработки; L_{ϕ} и L_u – размер формы и размер изделия после охлаждения; l и l_u – размер изделия до термообработки и после охлаждения.

Глава 8. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Эксплуатационные свойства материалов – это свойства, определяющие работоспособность изделия в определенных условиях эксплуатации.

К эксплуатационным свойствам относят:

- оптические свойства (показатель преломления, цветность, блеск и т. д.);
- электрические свойства (сопротивление, электрическая прочность, диэлектрическая проницаемость и т. д.);
- свойства горючести пластмасс (воспламеняемость, горючесть, нагревостойкость);
- химическая стойкость (растворимость, водопоглощение).

Оптические свойства полимеров – совокупность параметров, характеризующих взаимодействие пластмассы с электромагнитным излучением в видимой области спектра.

К оптическим свойствам полимеров относят – *показатель преломления, дисперсия, коэффициенты пропускания, поглощения и отражения, мутность, коэффициенты белизны, желтизны и блеска, а также параметры цветности.*

Показатель преломления $n(\lambda)$ – отношение скорости распространения монохроматического электромагнитного излучения в вакууме (c) к скорости распространения его в какой-либо среде $v(\lambda)$

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)}.$$

При переходе из среды 1 с показателем преломления n_1 в среду 2 с показателем преломления n_2 справедлив закон Снеллиуса:

$$n_1 \sin \varepsilon = n_2 \sin \varepsilon',$$

где ε и ε' – углы падения и преломления соответственно.

Стандарт испытаний – ГОСТ 19927 – 74 «Пластмассы. Методы определения показателя преломления».

Данный стандарт устанавливает три метода определения показателя преломления прозрачных полимерных материалов – *рефрактометрический, иммерсионно-микроскопический, иммерсионно-рефрактометрический.*

Рефрактометрический метод заключается в определении показателя преломления по предельному углу полного внутреннего отражения света при контакте образца испытуемого термопласта с призмой

рефрактометра. Метод применяют для образцов термопластов, полученных литьем или прессованием.

В этом методе используется эталонная призма PST , показатель преломления n_0 которой и угол Θ известны заранее. На грань PS наносят контактную жидкость (монобромнафталин) и устанавливают образец с размерами $20 \times 20 \times 10$ мм (рис. 2.23).

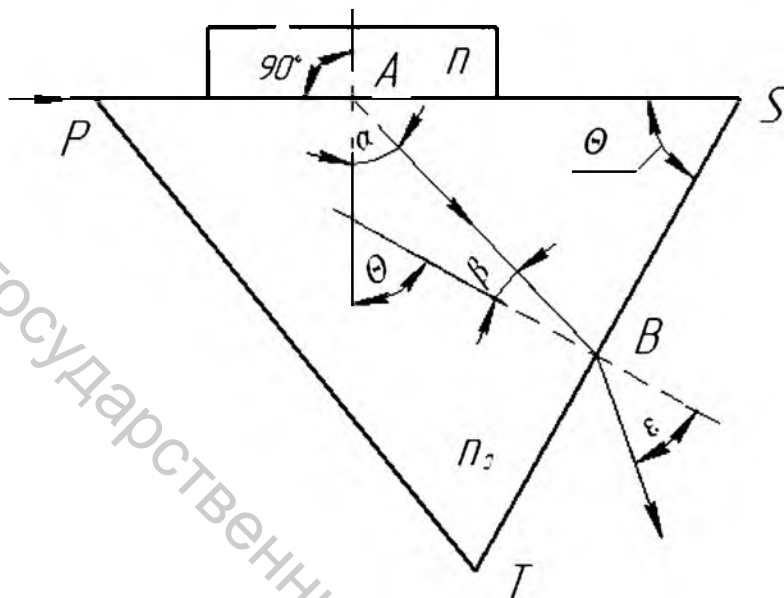


Рисунок 2.23 – Схема рефрактометрического метода

Боковую грань образца направляют в сторону источника света. Перемещением зрительной трубы рефрактометра находят такое положение, при котором видны два поля зрения – светлое и темное.

Таким образом определяется угол полного внутреннего отражения ε . Тогда показатель преломления образца находится по формуле

$$n = \sin \theta \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \varepsilon} \pm \cos \theta \sin \varepsilon,$$

где знак $+$ используется при $\Theta > 90^\circ$, знак минус – при $\Theta < 90^\circ$.

Иммерсионно-микроскопический метод заключается в появлении полос Бекке при наблюдении в микроскоп частиц порошка, гранул или бисера испытуемого материала, находящихся в иммерсионной жидкости с известным показателем преломления. Метод применяют для мелкогранулированных и порошкообразных полимерных материалов.

Для проведения испытаний нужен микроскоп с увеличением $200\times$. На предметное стекло наносят несколько капель иммерсионной жидкости с частицами порошка и помещают под микроскоп. В поле зрения микроскопа наблюдают узкие расходящиеся светлые круги (полосы Бекке), окаймляющие частицы. Если полосы не наблюдаются, то показатель преломления жидкости и испытуемого материала совпадают. Та-

ким образом, последовательно меняя иммерсионные жидкости определяют совпадение показателей преломления.

Иммерсионно-рефрактометрический метод заключается в возникновении в поле зрения окуляра рефрактометра четкой граничной линии при условии совпадения показателя преломления иммерсионной жидкости и образца. Метод применяют для мелкогранулированных и порошкообразных полимерных материалов.

Метод является комбинацией двух описанных выше. В кювету наливают иммерсионную жидкость и ставят на верхнюю грань призмы. Находят положение зрительной трубы рефрактометра, при котором наблюдается четкая граница раздела светлого и темного поля зрения. В кювету добавляют порошок, так чтобы он полностью покрыл дно, и наблюдают на изменении линии в рефрактометре. Если она остается четкой, то показатели преломления жидкости и порошка совпадают, если расплывается, то жидкость корректируют добавлением иммерсионной жидкости другого состава.

Среди не стандартизованных методов наиболее применим *метод призмы* (рис. 2.24). Он основан на определении угла минимального отклонения луча призмой, выполненной из исследуемого материала. Такой угол образуется при нормальном падении луча на биссектрису преломляющего угла призмы, при этом $\varepsilon_1 = \varepsilon_2'$ и $\varepsilon_1' = \varepsilon_2$, а угол отклонения δ луча SS' от первоначального направления SN имеет наименьшее значение. В этом случае показатель преломления определяется по формуле

$$n = \frac{\sin[(\delta + \Theta)/2]}{\sin \Theta/2}.$$

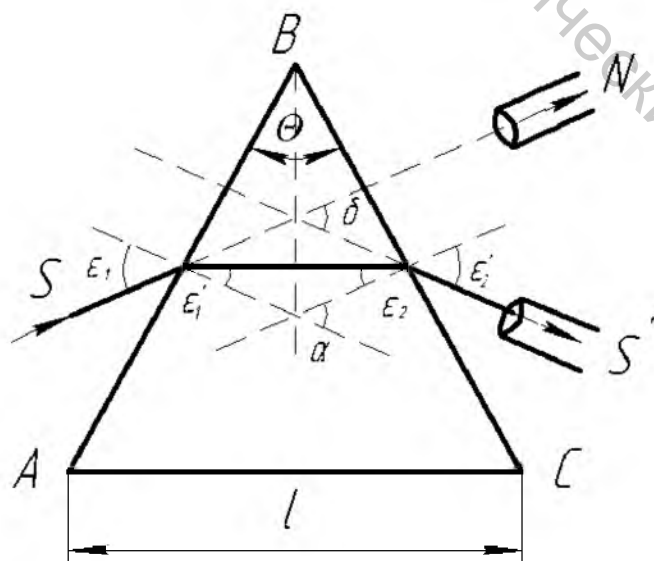


Рисунок 2.24 – Определение показателя преломления методом призмы

Дисперсия – зависимость показателя преломления образца от длины волны света. Для конкретного материала дисперсия оценивается как разность между показателями преломления для двух различных длин при определенных спектральных линиях.

Для видимой области спектра вычисляют коэффициент дисперсии

$$\nu = \frac{n_E - 1}{n_F - n_C},$$

где E , F и C – спектральные линии, длины волн которых используют для определения показателя преломления.

Коэффициенты поглощения, отражения и пропускания.

При прохождении потока света через материал наблюдается ослабление потока за счет потерь на отражение и поглощение. Согласно закону сохранения энергии для светового потока Φ , падающего на образец, выполняется условие

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3,$$

где Φ_1 – отраженный поток; Φ_2 – поглощенный поток; Φ_3 – прошедший через образец поток.

Коэффициент пропускания τ – отношение светового потока, прошедшего через образец Φ_3 , к потоку, падающему на образец

$$\tau = \frac{\Phi_3}{\Phi}.$$

Коэффициент отражения ρ – отношение светового потока, отраженного образцом Φ_1 , к потоку, падающему на образец

$$\rho = \frac{\Phi_1}{\Phi}.$$

Коэффициент поглощения α – отношение светового потока, поглощенного образцом Φ_2 , к потоку, падающему на образец

$$\alpha = \frac{\Phi_2}{\Phi}.$$

Таким образом,

$$\alpha + \rho + \tau = 1.$$

Для нормального падения луча, идущего из воздуха, значение ρ рассчитывается по формуле

$$\rho = \left[\frac{n - 1}{n + 1} \right]^2.$$

Значение α для образца в виде пластинки толщиной L , через кото-

рую проходит световой поток, рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{2\ln(1 - \rho) - \ln\tau}{L}.$$

Коэффициент пропускания τ определяют согласно ГОСТ 15875 – 80 «Пластмассы. Методы определения коэффициента пропускания и мутности».

В качестве прибора используют шаровой фотометр (рис. 2.25). Образцы используют размерами $60 \times 60 \times h$.

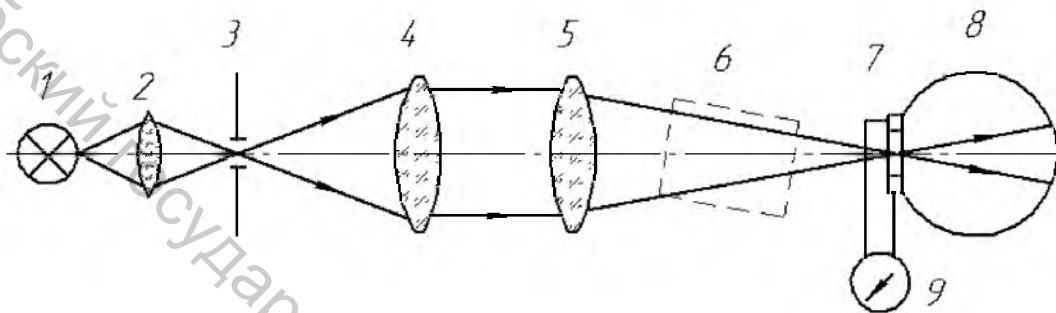


Рисунок 2.25 – Схема шарового фотометра:

1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – диафрагма; 4, 5 – объектив; 6 – образец; 7 – фотоэлемент; 8 – фотометрический шар; 9 – измерительный прибор

Измерение может проводиться абсолютным или относительным методом. *Абсолютный метод* состоит в непосредственном сравнении светового потока, прошедшего через испытуемый образец, со световым потоком, падающим на фотоэлемент в отсутствии образца. *Относительный метод* состоит в сравнении светового потока, прошедшего через испытуемый образец, со световым потоком, прошедшим через контрольный образец с известным коэффициентом пропускания.

При измерении пучок света, создаваемый осветительной системой, посылается на образец, находящийся под углом к оптической оси. Фотоэлемент фиксирует поток света, прошедший через образец, а амперметр определяет его силу I_1 . Затем образец выводят из фокуса и измеряют силу светового пучка от источника света – I_2 . Коэффициент пропускания рассчитывают по зависимости

$$\tau = \frac{I_1}{I_2}.$$

Мутность H – отношение коэффициента рассеянного пропускания τ_s к коэффициенту пропускания τ определяется количеством рассеянного света, отклоненного от направления падающего пучка в среднем более чем на $2^\circ 30'$.

$$H = \frac{\tau_s}{\tau}$$

Коэффициент отражения ρ определяют в соответствии с ГОСТ 9784 – 75 «Стекло органическое светотехническое листовое. Технические условия».

В качестве прибора используют фотометрический прибор ФШУ (рис. 2.26).

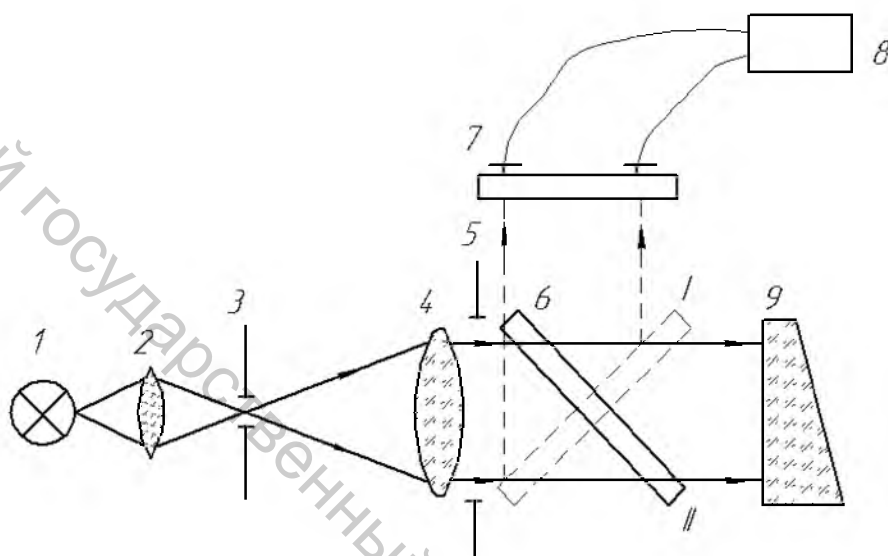


Рисунок 2.26 – Схема измерения коэффициента отражения:

1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – диафрагма; 4 – объектив; 5 – диафрагма; 6 – зеркало; 7 – фотоэлемент; 8 – измерительный прибор; 9 – образец

Световой пучок, создаваемый осветительной системой, посылается на образец через светоделительную пластину. После отражения от поверхности образца световой поток от пластинки отражается на фотоэлемент. Амперметр фиксирует силу светового потока I_1 . Затем пластинка поворачивается на 90° , и весь световой поток поступает на фотоэлемент – I_2 . Коэффициент отражения рассчитывают по зависимости

$$\rho = \frac{I_1}{I_2 \tau}$$

Коэффициенты белизны и блеска.

Блеск и белизну изделий определяют следующими методами:

- визуальным – сравнивают между собой образцы с различной степенью отражения;
- объективным – сравнивают поверхность исследуемого образца с поверхностью эталонного образца, коэффициент отражения которого известен;

- фотоэлектрическим – сравнивают коэффициент отражения исследуемого образца с коэффициентом отражения эталона.

Стандартизован фотоэлектрический метод. Измерение блеска проводится по нему в соответствии с ГОСТ 896 – 69 «Материалы лакокрасочные. Фотоэлектрический метод определения блеска».

Сущность метода определения блеска заключается в измерении величины фототока, возбуждаемого в фотоприемнике под действием пучка света, отраженного от поверхности объекта.

Для измерений используется прибор ФБ-2, принципиальная схема которого изображена на рисунке 2.27. При измерении блеска оптические оси систем осветителя и фотодетектора должны находиться под равными углами относительно перпендикуляра к измеряемой поверхности.

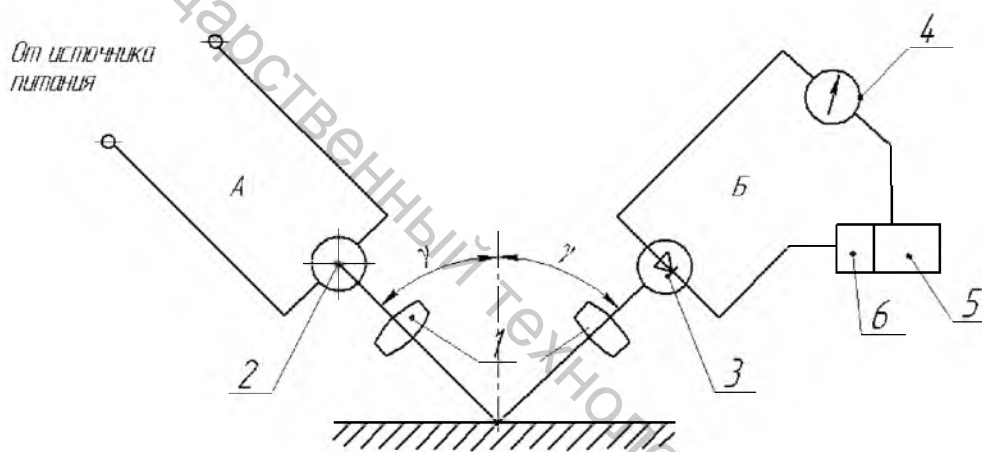


Рисунок 2.27 – Схема фотоэлектрического блескомера ФБ-2:

1 – оптическая система; 2 – осветитель; 3 – фотоприемник; 4 – измерительный прибор; 5, 6 – электронный блок

Измерительным инструментом в приборе является микроамперметр М95 (10 мкА). Число делений шкалы микроамперметра – 100.

Степень блеска оценивается сравнением отражательной способности поверхности материала и поверхности эталона.

$$K_6 = \frac{\rho_m}{\rho_э},$$

где ρ_m – коэффициент отражения материала; $\rho_э$ – коэффициент отражения эталона.

В качестве эталона блеска применяют увиолевое стекло ($\rho = 0,65$).

Степень белизны оценивают по такой же методике, только в качестве эталона белизны применяют молочно-белое стекло ($\rho = 1,00$).

Глава 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Электрические свойства полимеров – совокупность параметров, характеризующих поведение пластмассы в электромагнитном поле.

Электрические свойства в постоянном и переменном электромагнитных полях у полимеров различны.

В постоянном поле наиболее часто используются следующие параметры: *электрическое сопротивление, электрическая проводимость и электрическая прочность*.

В переменном поле электрическими параметрами полимера являются *диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери*.

Электрическое сопротивление и электропроводность

По величине удельного объемного электрического сопротивления все твердые тела подразделяются на три группы, ρ_v , Ом·м:

- диэлектрики (изоляторы) $> 10^8$;
- полупроводники $10^2 \div 10^8$;
- проводники: проводящие $10^{-2} \div 10^2$; высокопроводящие $10^{-6} \div 10^{-2}$.

Удельное объемное электрическое сопротивление — это сопротивление между электродами, приложенными к противоположным граням единичного куба с размером стороны 1 м – выражается в Ом·м. Значение ρ_v для пластмасс изменяется в очень широких пределах от 10^{-3} до 10^{18} Ом·м.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление — сопротивление между противоположными сторонами единичного квадрата со стороной 1 м на поверхности полимерного образца — выражается в Ом.



Рисунок 2.28 – Удельные объемные сопротивления полимерных материалов и металлов

Стандарт испытаний – ГОСТ 6433.2 – 71 «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении».

Измерения удельных объемного и поверхностного сопротивлений проводят методом измерения токов, проходящих через образец (p_v) или по поверхности образца (p_s) при приложении к нему постоянного по напряжению электрического поля.

Образцы. Образцы представляют собой диски диаметром 50 ± 1 мм или 100 ± 1 мм и толщиной 1,5 – 4 мм. Они не должны иметь видимых невооруженным глазом трещин, вмятин, сколов, заусенцев, загрязнений, царапин. Плоскости образцов должны быть параллельными.

Проведение испытаний. Измерительная ячейка состоит из трех электродов, которые подсоединяются к измерительному прибору в зависимости от вида измерения. Для определения p_v схему собирают по рис. 2.29.

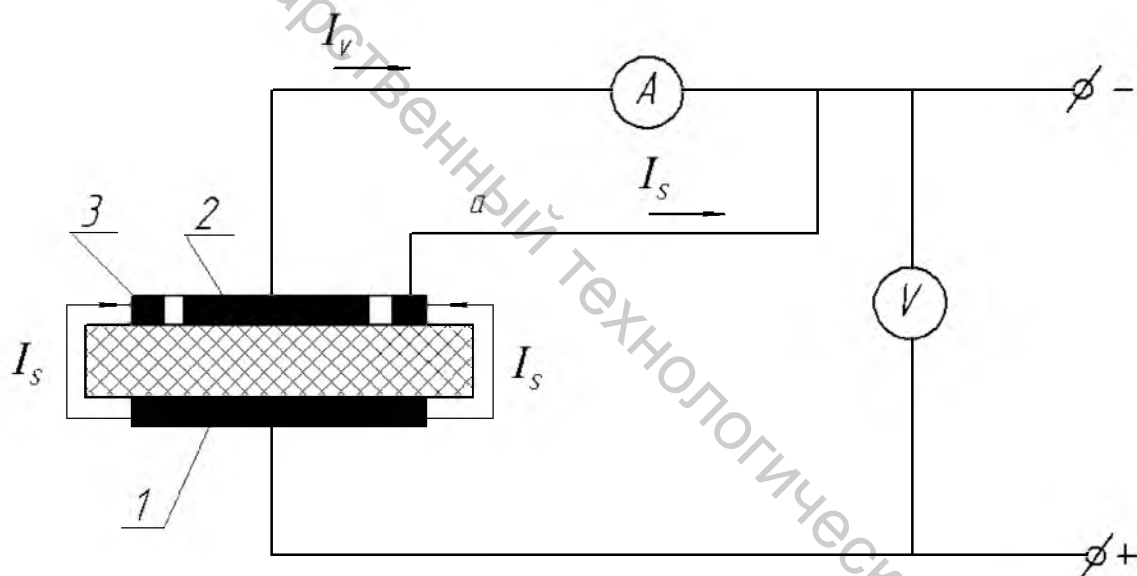


Рисунок 2.29 – Схема установки для измерения I_v :

1 – электрод напряжения; 2 – измерительный электрод; 3 – охранный электрод

Для измерения p_s нижний измерительный электрод подключают к клемме «минус», а охранный электрод подключают к клемме «плюс» (рис. 2.30). Поверхностное сопротивление измеряется по падению напряжения тока, проходящего по кольцевой поверхности образца.

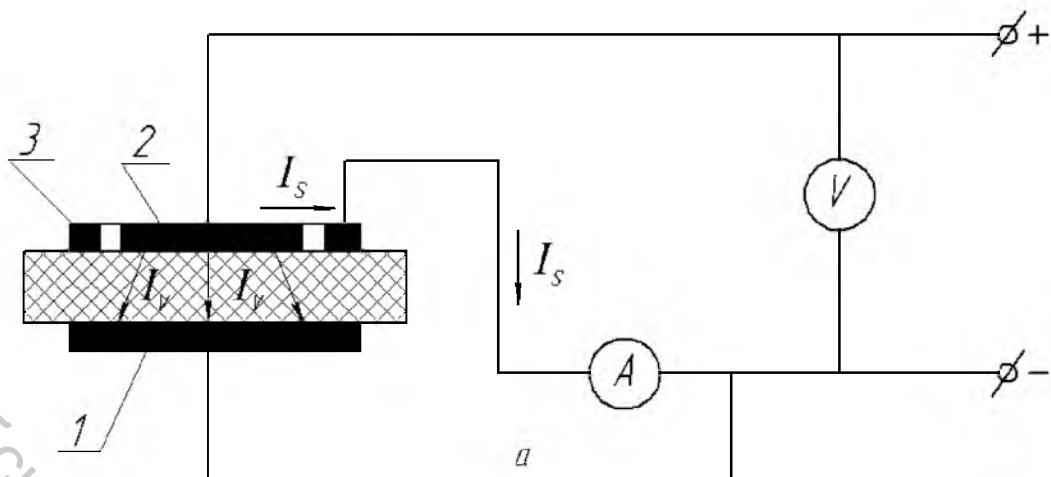


Рисунок 2.30 – Схема установки для измерения I_s :

1 – охранный электрод; 2 – электрод напряжения; 3 – измерительный электрод

Охранный электрод применяется для компенсации концевого эффекта и выравнивания силового поля по площади электрода.

Измерив объемный ток I_v и поверхностный ток I_s – рассчитывают соответственно удельные сопротивления ρ_v и ρ_s :

$$\rho_v = \frac{U \cdot S}{I_v \cdot h};$$

$$\rho_s = \frac{U \cdot S}{I_s \cdot h},$$

где S – площадь верхнего электрода; I_v – объемный ток; I_s – поверхностный ток; h – толщина образца.

Электропроводность – величина, обратная электрическому сопротивлению. Электропроводность промышленным пластмассам придается введением в них определенных количеств металлосодержащих наполнителей: порошков металлов, металлических волокон и тканей.

Если напряженность электрического поля, в котором находится полимерный диэлектрик, превысит некоторое критическое значение, характерное для каждого вида пластмассы, то она утрачивает свои электроизоляционные свойства. Это явление называется пробоем диэлектрика, а вызвавшее его значение напряженности — **электрической прочностью диэлектрика** (E' , МВ/м):

$$E' = \frac{U_{\text{пр}}}{h},$$

где $U_{\text{пр}}$ — напряжение пробоя, МВ; h — толщина слоя полимера.

Различают несколько видов пробоя: электрический, электромеханический, тепловой и электрохимический или пробой от действия газовых разрядов.

Электромеханический пробой возникает под электродами или на участке деформирования пластмассовой детали (крепеж, контактор и другие). При равновесии электрических сил, вызывающих сжатие, и сил упругости полимерного материала для оценки электрической прочности применимо выражение:

$$E' \approx 0,6 \sqrt{\frac{E}{\varepsilon' \cdot \varepsilon'_0}},$$

где E – модуль упругости полимерного диэлектрика, МПа; ε' и ε'_0 – диэлектрическая проницаемость соответственно диэлектрика и абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Стандарт испытаний. Измерения электрической прочности проводят согласно ГОСТ 6433.3 – 71 «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрической прочности при переменном (частоты 50 Гц) и постоянном напряжении».

Образцы. Для испытаний применяют плоские образцы толщиной не менее 1,5 мм и размерами 100×25 мм.

При испытаниях применяют два цилиндрических электрода разных диаметров, причем диаметр нижнего электрода D_1 должен не менее, чем в три раза превышать диаметр верхнего электрода D или два цилиндрических электрода одинакового диаметра (рис. 2.31).

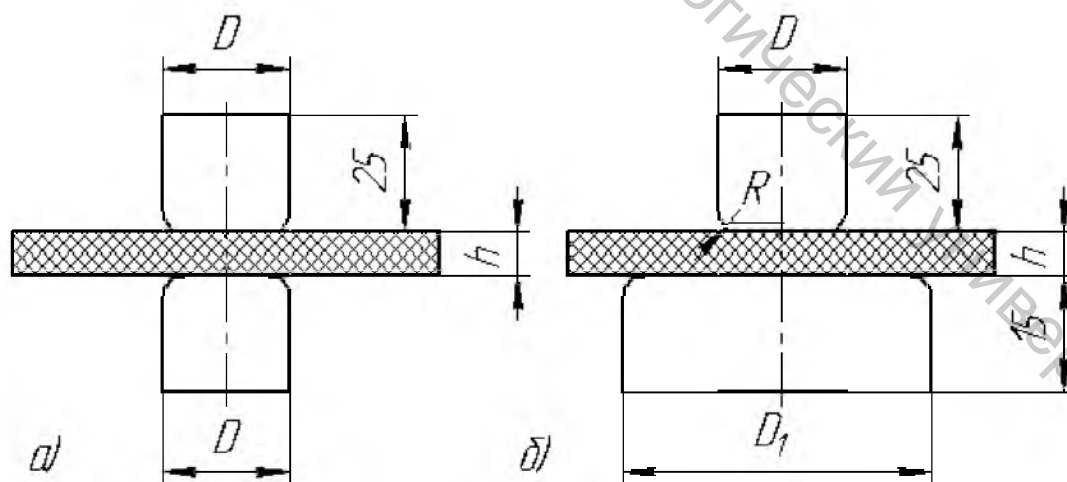


Рисунок 2.31 – Способы установки электродов:

а) с электродами одинакового диаметра; б) с электродами разного диаметра

Схема установки для испытания электрической прочности полимеров представлена на рисунке 2.32. Установка должна обеспечивать напряжение с частотой 50 Гц в диапазоне 0,5 ÷ 200 кВ.

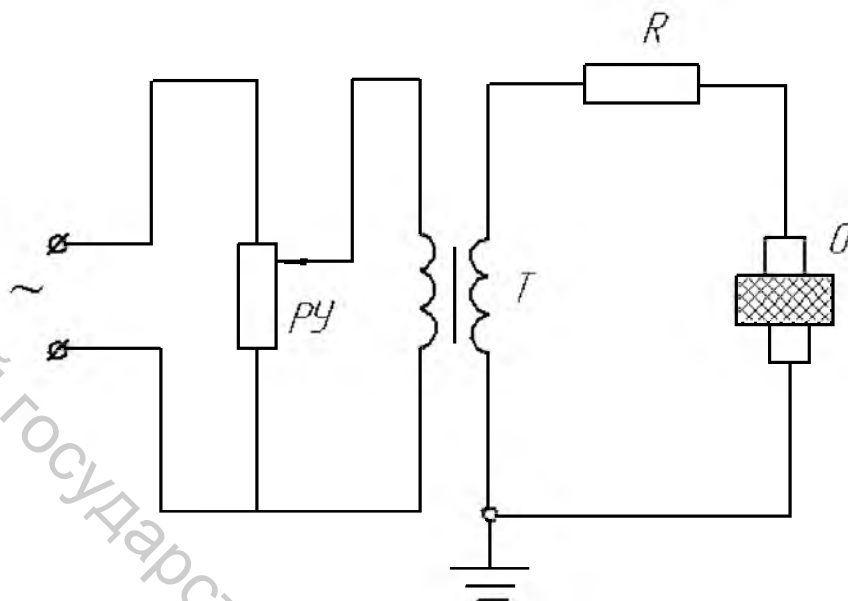


Рисунок 2.32 – Схема установки для измерения электрической прочности:

O – образец; T – высоковольтный испытательный трансформатор; R – защитное сопротивление; PY – реостат

Скорость изменения напряжения должна быть такой, чтобы пробой наступал через 10 ÷ 20 с после начала испытаний. Значение электрической прочности определяют по формуле

$$E' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{U_{np}}{h},$$

где U_{np} — напряжение пробоя, кВ; h — толщина слоя полимера, мм.

Диэлектрическая проницаемость является параметром, равным отношению емкости c_x электрического конденсатора, между обкладками которого находится полимерный материал, к емкости того же конденсатора, между обкладками которого вакуум:

$$\varepsilon' = \frac{c_x}{c_0}.$$

С достаточной для практических целей точностью допускается определение ε' при c_0 в воздушном объеме.

По величине ε' все полимерные материалы условно подразделяются на группы:

- неполярные $1,8 < \varepsilon' < 2,3$;
- малополярные $2,3 < \varepsilon' < 3,0$;
- полярные $3,0 < \varepsilon' < 4,0$;
- сильнополярные $\varepsilon' > 4,0$.

Стандарт испытаний – ГОСТ 22372 – 77 «Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц».

Диэлектрическую проницаемость измеряют при помощи моста переменного тока (рис. 2.33). К мосту подводится переменное напряжение с частотой 50 Гц от трансформатора T , один из выводов которого заземлен. Соответственно заземлена точка 3 моста.

Исследуемый образец c_x включается в плечо 1 – 2, эталон c_0 – в плечо 1 – 4. Два разрядника P подключены к точкам моста 2 и 4 для отвода на землю токов в случае пробоя конденсаторов. Путем подбора значений регулируемых сопротивления R_3 и емкости c_4 достигается равновесие моста. Тогда

$$c_x = \frac{c_0 \cdot R_4}{R_3}.$$

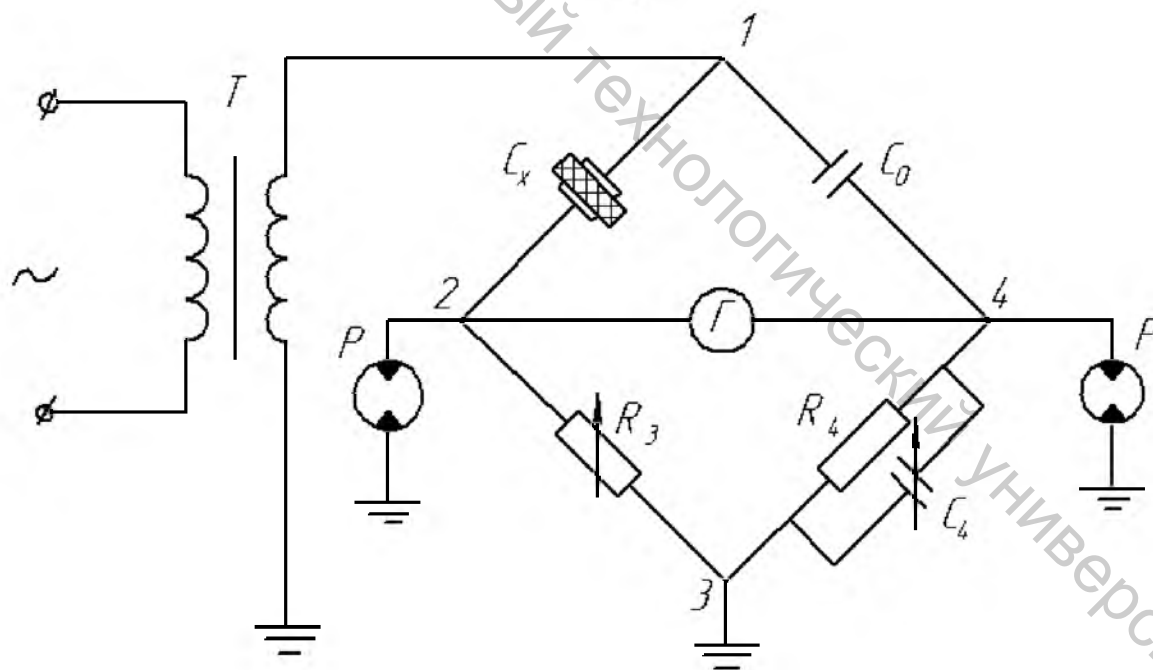


Рисунок 2.33 – Схема моста переменного тока:

P – разрядник; T – трансформатор; Γ – гальванометр; C_x – образец; C_0 – эталонный конденсатор; R_3 – переменное сопротивление; R_4 – постоянное сопротивление; C_4 – переменная емкость

С увеличением частоты электрического поля диэлектрическая проницаемость у большинства полимерных материалов незначительно снижается.

Диэлектрические потери ε'' — это энергия, которая рассеивается в полимерном диэлектрике при прохождении через него электрического тока. Диссипация внешней энергии сопровождается нагревом физического тела:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

Величина диэлектрических потерь определяется значением $\operatorname{tg} \delta$, который составляет от 0,3 для аминопластов до $1 \cdot 10^{-4}$ для УПС. Чем меньше величина $\operatorname{tg} \delta$, тем выше возможности полимера как диэлектрика.

Диэлектрические потери полимеров определяются двумя физическими причинами: электрической проводимостью (сквозной ток) и дипольно-релаксационной поляризацией (ток замедленной поляризации).

Обычно $\operatorname{tg} \delta$ измеряют на мосте переменного тока. При равновесии моста $\operatorname{tg} \delta$ численно равен величине регулируемой емкости c_4 моста.

$$\operatorname{tg} \delta = c_4.$$

К свойствам горючести пластмасс относят воспламеняемость, стойкость к горению, нагревостойкость.

Воспламеняемость – способность полимерного материала сопротивляться началу пламенного горения под воздействием внешнего источника зажигания.

Стандарт испытаний. Испытания воспламеняемости проводят в соответствии с ГОСТ 21207 – 81 «Пластмассы. Метод определения воспламеняемости».

Сущность метода заключается в определении длины обуглившейся части образца и времени его горения в результате воздействия пламени газовой горелки в течение 60 с. Метод не распространяется на пластмассы, образец из которых сгорает менее, чем за 60 с или коробится и становится недосягаемым для пламени.

Схема прибора для испытания на воспламеняемость представлена на рисунке 2.34.

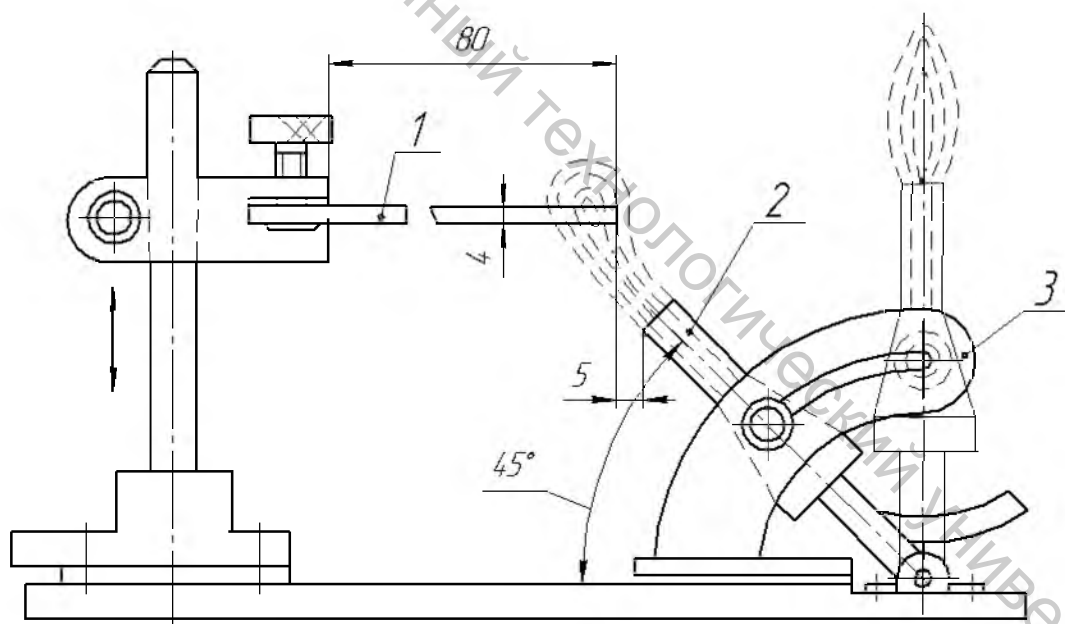


Рисунок 2.34 – Схема прибора для определения воспламеняемости:

1 – образец; 2 – горелка Бунзена; 3 – поворотное приспособление

Образцы. Для испытания применяют образцы в форме бруска длиной не менее 100 мм, шириной от 10 до 15 мм, толщиной от 3 до 5 мм и с площадью поперечного сечения от 40 до 50 мм². Предельные отклонения по толщине и ширине образцов не должны превышать $\pm 0,5$ мм.

Рекомендуется применять образцы шириной $(10 \pm 0,5)$ мм и толщиной $(4 \pm 0,5)$ мм.

На образцы наносят линию-метку по ширине, перпендикулярно оси образца на расстоянии 80 мм от того конца, который будут поджигать.

Проведение испытаний. Подготовленную к испытанию горелку с помощью поворотного приспособления устанавливают в рабочее положение Б. Этот момент принимают за начало отсчета времени, поджога образца и включают секундомер. Через 60 с после поджога образца горелку выключают, одновременно включают секундомер и измеряют время горения образца.

Если передний край пламени достигнет метки на образце, то секундомер останавливают, испытание прекращают и пламя гасят.

Если образец гаснет раньше достижения переднего края пламени метки на образце, то испытание прекращают не ранее, чем через 30 с после выключения горелки.

После окончания испытания включают вентиляцию для удаления продуктов сгорания.

Измеряют наименьшее расстояние между меткой и обуглившейся кромкой на обеих сторонах образца по его ширине. В дальнейший расчет принимают наименьшее из этих двух измерений (l).

Длину обуглившейся части образца (L) в миллиметрах вычисляют по формуле

$$L = \frac{\Sigma(80 - l)}{n},$$

где l – наименьшее расстояние между меткой и обуглившейся частью отдельного образца, мм; n – количество испытываемых образцов.

Время горения определяют как среднее арифметическое времени горения не менее пяти образцов.

Стойкость к горению – способность материала противодействовать пламени.

Стандарт испытаний. Испытания на стойкость к горению проводят в соответствии с ГОСТ 28157 – 89 «Пластмассы. Методы определения стойкости к горению».

Образцы. Испытания проводят на пяти образцах, имеющих форму брусков длиной (125 ± 5) , шириной $10 \div 13$ и толщиной $1 \div 13$ мм.

Проведение испытаний.

Метод А. Сущность метода заключается в определении скорости распространения пламени по горизонтально закрепленному образцу. При испытании по методу А образец закрепляют в зажиме за конец, наиболее удаленный от метки 25 мм, и располагают таким образом, чтобы его продольная ось находилась в горизонтальном положении, а поперечная ось – под углом 45° к горизонтали (рис. 2.35).

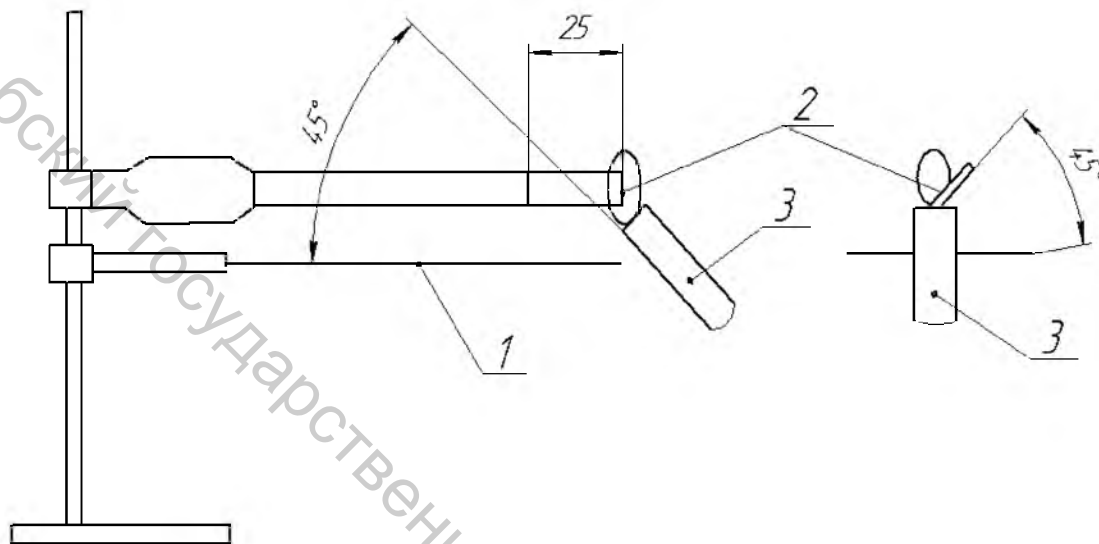


Рисунок 2.35 – Установка для испытания на горение горизонтально закрепленного образца:

1 – металлическая (проволочная) сетка; 2 – образец; 3 – горелка

Горизонтально закрепленные образцы по стойкости к горению относят к категории ПГ (пламя горелки является источником воспламенения горизонтально закрепленного образца).

Пламя горелки подносят к нижней кромке свободного конца образца. Центральная ось патрубка горелки должна находиться в той же вертикальной плоскости, что и продольная ось образца, и под углом 45° к горизонтали. Пламя подносят на 30 с без изменения положения горелки так, чтобы торец образца был погружен в пламя на глубину около 6,5 мм, и затем удаляют от образца.

Если образец сгорает до метки 25 мм менее, чем на 30 с, то горелку удаляют от образца, как только пламя достигает метки 25 мм.

Если образец продолжает гореть после удаления горелки, то фиксируют время t (с) горения образца между метками и рассчитывают скорость горения v (мм/мин).

Если фронт пламени распространяется от метки 25 мм, но не достиг метки 100 мм, фиксируют время горения и длину L (мм) поврежденной части образца между меткой 25 мм и местом на образце, до которого распространился фронт пламени.

Материал соответствует категории ПГ, если при его горении выполняются следующие условия:

- 1) для образцов толщиной от 3 до 13 мм скорость горения не должна превышать 40 мм/мин на участке между метками;
- 2) для образцов толщиной менее 3 мм скорость горения не должна превышать 75 мм/мин на участке между метками;
- 3) горение прекращается до того, как пламя достигнет метки 100 мм.

Если хотя бы один образец из пяти не удовлетворяет этим условиям, то испытание проводят еще на пяти образцах. Если хотя бы один образец второй серии не удовлетворяет требованиям, то материал не может быть классифицирован как ПГ.

Скорость горения v , мм/мин, каждого образца, испытанного по методу А, вычисляют по формуле

$$v = \frac{60L}{t},$$

где L – длина сгоревшей части, мм; t – время горения, с.

Если скорость горения нельзя рассчитать (образец гаснет после удаления пламени горелки), испытание следует провести по методу Б, чтобы определить наивысшую категорию стойкости к горению, к которой может быть отнесен данный материал.

Метод Б. Сущность метода заключается в определении времени горения и тления вертикально закрепленного образца (рис. 2.36). По стойкости к горению вертикально закрепленные образцы относят к категориям ПВ-0, ПВ-1, ПВ-2 (пламя горелки является источником воспламенения вертикально закрепленного образца).

Пламя горелки подносят к центру свободного конца образца на 10 с. Затем горелку удаляют от образца не менее чем на 150 мм и регистрируют время горения образца. Когда горение образца прекратится, пламя подносят к образцу повторно. Через 10 с пламя снова удаляют от образца и регистрируют время горения и тления.

Если при горении образца наблюдается падение расплавленных и горящих частиц материала, то горелку следует установить под углом 45° и сместить ее от центра влево или вправо по ширине образца, чтобы исключить попадание капель материала в горелку. Расстояние между нижним концом образца и концом патрубка горелки во время испытания следует поддерживать равный 10 мм.

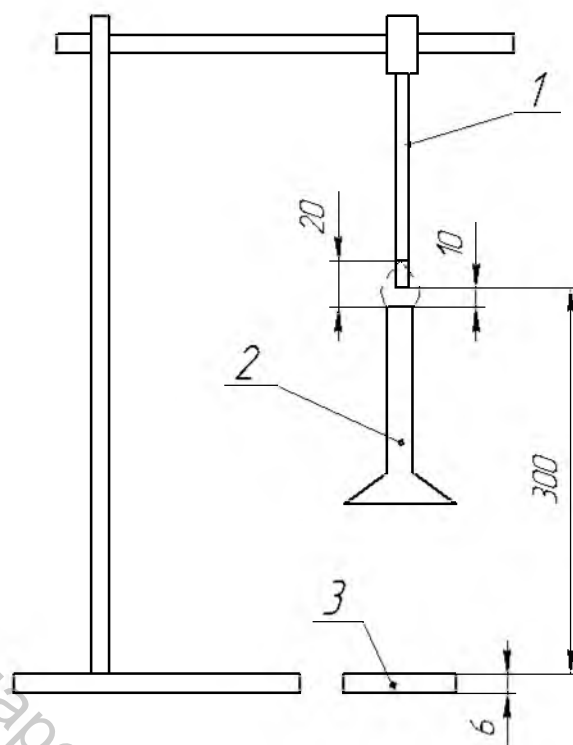


Рисунок 2.36 – Установка для испытания на горение вертикально закрепленного образца:

1 – образец; 2 – горелка; 3 – вата

Во время испытания следует фиксировать следующие показатели:

- 1) время горения t_1 после первого приложения пламени к образцу;
- 2) время горения t_2 после второго приложения пламени к образцу;
- 3) время тления t_3 после второго приложения пламени;
- 4) число образцов, сгоревших до зажима;

5) наличие горящих капель или частиц, которые зажигают гигроскопическую хирургическую вату под образцом.

По результатам испытаний определяют категорию горючести материала.

Материалы, отнесенные к категории ПВ-0, должны удовлетворять следующим требованиям:

1) время горения образца не должно превышать 10 с после каждого приложения пламени;

2) суммарное время горения серии из пяти образцов после двукратного приложения пламени не должно превышать 50 с;

3) ни один из образцов не должен гореть или тлеть до зажима;

4) гигроскопическая хирургическая вата, находящаяся на расстоянии 300 мм под образцом, не должна воспламеняться падающими ча-

стицами вещества;

5) ни один образец не должен гореть и тлеть более 30 с после второго удаления пламени.

Материалы, отнесенные к категории ПВ-1, должны удовлетворять следующим требованиям:

1) время горения образца не должно превышать 30 с после каждого приложения пламени;

2) суммарное время горения пяти образцов после двукратного приложения пламени не должно превышать 250 с;

3) ни один из образцов не должен гореть или тлеть до зажима;

4) гигроскопическая хирургическая вата, находящаяся на расстоянии 300 мм под образцом, не должна воспламеняться падающими частицами вещества;

5) ни один образец не должен гореть и тлеть более 60 с после второго удаления пламени.

Материалы, отнесенные к категории ПВ-2, должны удовлетворять следующим требованиям:

1) время горения образца не должно превышать 30 с после каждого приложения пламени;

2) суммарное время горения серии из пяти образцов после двукратного приложения пламени не должно превышать 250 с;

3) ни один из образцов не должен гореть или тлеть до зажима;

4) допускается воспламенение гигроскопической хирургической ваты, находящейся на расстоянии 300 мм под образцом, падающими частицами вещества от поджигаемого образца;

5) ни один образец не должен гореть и тлеть более 60 с после второго удаления пламени.

Если хотя бы один образец из пяти не удовлетворяет требованиям п. 1 – 5, испытания повторяют еще на пяти образцах. Если и в повторном испытании хотя бы один образец не удовлетворяет требованиям, то испытания проводят по методу А.

Для каждого образца, испытанного по методу Б, вычисляют суммарное время горения t_{Γ} , с, после двукратного приложения пламени по формуле

$$t_{\Gamma} = t_1 + t_2.$$

Суммарное время горения t_{Σ} , с, пяти образцов после двукратного приложения пламени вычисляют по формуле

$$t_{\text{сГ}} = \sum_{i=1}^5 t_{\text{Г}}.$$

Время горения и тления $t_{\text{ГТ}}$, с, для каждого образца после второго приложения пламени вычисляют по формуле

$$t_{\text{ГТ}} = t_2 + t_3.$$

Нагревостойкость – способность полимерного материала сохранять свои характеристики в процессе ускоренного теплового старения.

К характеристикам нагревостойкости относят – *температурный индекс, диапазон нагревостойкости и относительный температурный индекс.*

Температурный индекс (ТИ) – характеристика нагревостойкости электроизоляционного материала, численно равная значению температуры в градусах Цельсия, полученному из графика сроков службы при времени срока службы 20000 ч.

Диапазон нагревостойкости (ДН) – характеристика нагревостойкости электроизоляционного материала, определяемая тремя значениями температур в градусах Цельсия, соответствующими срокам службы 20000 и 5000 ч и нижнего доверительного интервала с вероятностью 95 % для температуры, соответствующей сроку службы 5000 ч.

Относительный температурный индекс (ОТИ) – температурный индекс неизвестного материала, получаемого из времени, соответствующего признанной эксплуатационной температуре известного материала, при условии, что оба материала подвергаются сравнительным испытаниям согласно принципам, установленным в настоящем стандарте.

Стандарт испытаний. Оценку нагревостойкости проводят в соответствии с ГОСТ 27710 – 88 «Материалы электроизоляционные. Общие требования к методу испытания на нагревостойкость».

Сущность метода заключается в определении изменений проверяемых характеристик образцов в процессе ускоренного теплового старения и в оценке на базе проведенных испытаний характеристик нагревостойкости.

Проведение испытаний. Испытания проводятся в следующей последовательности:

- 1) выбор проверяемых характеристик;
- 2) выбор конечной точки испытания;
- 3) проведение ускоренного старения образцов, по крайней мере, при 3 и более повышенных температурах цикличности, либо непрерывно до определенного изменения проверяемой харак-

теристики (достижения критерия конечной точки), или до разрушения образцов;

- 4) определение расчетным путем температурного индекса и диапазона нагревостойкости из графика службы изделия.

Для оценки нагревостойкости могут быть использованы следующие проверяемые характеристики и их критерии конечной точки:

- пробивное напряжение – 50 % от величины перед старением;
- предел прочности при изгибе – 50 % от величины перед старением;
- потеря массы – 10 % от величины массы перед старением.

В качестве прибора для проведения испытаний используется термошкаф с принудительной циркуляцией воздуха и соответствующий контролируемой характеристике прибор.

Температурный индекс (ТИ) для 20000 ч определяют из графика сроков службы и записывают в форме ТИ: J_{20} (например, ТИ: 132).

Если ТИ устанавливают для другого срока службы, то его записывают в форме $ТИ_{5000}/J_5$ (например, $ТИ_{5000}/148$, где 5000-срок службы 5000 ч, для которого ТИ установлен).

Для определения *относительного температурного индекса* (ОТИ) проводят сравнительные испытания нового и известного в эксплуатации материала при старении в одних термостатах, строят графики сроков службы обоих материалов на одном листе. На графике известного материала определяют время, соответствующее его признанной эксплуатационной температуре, и относительно этого времени определяют температурный индекс второго материала. Относительный температурный индекс записывают в форме ОТИ/J (например, ОТИ/141).

Диапазон нагревостойкости определяют из графика сроков службы и записывают в форме ДН: $J_{20}/J_5 (J_C)$, например, ДН: 132/148 (140).

Глава 11. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Неразрушающий контроль (НК) позволяет проверить качество продукции без нарушения ее пригодности к использованию по назначению. Основными задачами НК являются:

- выявления дефектов типа нарушения сплошности материала изделия;
- оценки структуры материала изделия;
- контроля геометрических параметров изделия;
- оценки физико-химических свойств материалов.

Отечественный подход к классификации методов неразрушающего контроля отражен в ГОСТ 18353 – 73 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов». Выделяют десять основных видов НК:

- | | |
|---------------------|--|
| (01) – акустический | (06) – радиоволновой |
| (02) – капиллярный | (07) – тепловой |
| (03) – магнитный | (08) – течеискания |
| (04) – оптический | (09) – электрический |
| (05) – радиационный | (10) – электромагнитный (вихревых токов) |

Внутри каждого основного вида методы НК различают (рис. 2.37) по характеру используемых физических полей, излучений и веществ, их взаимодействию с контролируемым объектом, первичным информативным параметром, а также по способу индикации и предоставления информации о результатах контроля.



Рисунок 2.37 – Структура кода метода НК

По видам контролируемых параметров средства неразрушающего контроля разделяются на:

- приборы и установки, предназначенные для обнаружения дефектов типа нарушений сплошности;
- приборы для контроля геометрических характеристик;
- приборы для измерения физико-механических и физико-химических характеристик;
- приборы технической диагностики для предсказания возникновения различного рода дефектов, изменения размеров и физико-механических свойств изделий на период эксплуатации изделий.

Выбор метода и прибора НК для решения задач дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и технической диагностики зависит от параметров контролируемого объекта и условий его обследования.

При выборе метода или комплекса методов для дефектоскопического контроля конкретных деталей или узлов необходимо учитывать, кроме специфических особенностей и технологических возможностей каждого метода, следующие основные факторы:

- *характер дефекта и его расположение;*
- *условие работы деталей и технические условия на отбраковку;*
- *материал детали;*
- *состояние и чистоту обработки поверхности;*
- *форму и размер детали;*
- *зоны контроля;*
- *условия контроля.*

Характер дефекта – в зависимости от происхождения дефекты различаются размерами, формой и средой, заполняющих их полости. Дефекты подразделяют на поверхностные, подповерхностные (до 0,5 – 1 мм) и внутренние (глубина более 1 мм). Для выявления поверхностных дефектов применимы все методы, но наиболее эффективные из них магнитопорошковый и капиллярный. Для обнаружения подповерхностных дефектов эффективны ультразвуковой, токовихревой, магнитопорошковый, а внутренних – только ультразвуковой и методы просвечивания ионизирующими излучениями.

Условия работы детали – внешние нагрузки (статические, динамические, вибрационные), возможные перегрузки, внешняя среда, температурные условия и др.

Технические условия на отбраковку определяют количественные критерии отбраковки и позволяют выбрать метод, выявляющий только опасные для данной конструкции дефекты.

Физические свойства материала деталей – это постоянно действующий фактор, определяющий выбор метода НК. Так, для применения магнитопорошкового метода материал детали должен быть ферромагнитным и однородным по магнитным свойствам структуры. Для токовых хвостового контроля материал должен быть электропроводным, однородным по структуре и изотропным по магнитным свойствам. Для ультразвукового контроля на трещины материал должен быть мелкозернистым по структуре, должен обладать свойствами упругости и малым коэффициентом затухания ультразвуковых колебаний.

Форма и размеры контролируемых деталей. Ряд методов (магнитный, капиллярный, просвечивание рентгеновским излучением) может применяться для контроля большинства деталей различной формы и размеров. Ультразвуковой метод не подходит для контроля деталей сложной формы, из-за трудности расшифровки результатов контроля и наличия непрозвучиваемых участков. Крупногабаритные изделия контролируют, как правило, по частям.

Зоны контроля. Определение зон контроля является важным фактором в выборе метода, так как их знание облегчает разработку методики обнаружения дефектов.

Состояние и чистота обработки контролируемой поверхности. Чувствительность методов зависит от чистоты обработки контролируемой поверхности и наличия на ней защитных покрытий.

Условия контроля. Контроль детали может проводиться в лаборатории, цехе или полевых условиях. Контроль детали можно проводить без разборки или с разборкой узла.

Итак, окончательно можно дать следующий алгоритм выбора методов НК:

- определить вид дефектов, зоны контроля, их характеристики и условия контроля, задать критерии на отбраковку;
- по этим данным по справочнику («Неразрушающий контроль металлов и изделий») определить возможные методы НК;
- принимая во внимание критерии на отбраковку, чувствительность и специфику методов, выбрать методы и средства для применения.

Предпочтение отдается тому методу, который проще или у которого выше достоверность результатов и производительность.

Рекомендуемая литература

- 1 ГОСТ 27.001 – 95. Система стандартов "Надежность в технике". Основные положения. – Введ. 1997 – 10 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1997. – 6 с.
- 2 ГОСТ 27.002 – 89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1990 – 07 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 24 с.
- 3 ГОСТ 27.301 – 95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – Введ. 1997 – 10 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1997. – 12 с.
- 4 ГОСТ 27.410 – 87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. – Введ. 1989 – 01 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 77 с.
- 5 ГОСТ 20911 – 89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Введ. 1991 – 01 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1990.
- 6 ГОСТ 263 – 75. Резина. Метод определения твердости по Шору А. – Введ. 1977 – 01 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1977. – 4 с.
- 7 ГОСТ 4647 – 80. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи. – Введ. 1981 – 06 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.
- 8 ГОСТ 11262 – 80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – Введ. 1980 – 12 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 11 с.
- 9 ГОСТ 12423 – 66. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). – Введ. 1967 – 07 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 8 с.
- 10 ГОСТ 14359 – 69. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования. – Введ. 1970 – 01 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1971. – 9 с.
- 11 ГОСТ 15088 – 83. Пластмассы. Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика. – Введ. 1985 – 01 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1991. – 7 с.
- 12 ГОСТ 15139 – 69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы). – Введ. 1970 – 07 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1970. – 16 с.

- 13 ГОСТ 20403 – 75. Резина. Метод определения твердости в международных единицах (от 30 до 100 IRHD). – Введ. 1981 – 01 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.
- 14 ГОСТ 21341 – 75. Пластмассы. Метод определения теплостойкости по Мартенсу. – Введ. 1978 – 01 – 01. – Москва : Изд-во стандартов, 1978. – 9 с.
- 15 Матвиевский, В. Р. Надежность технических систем : учебное пособие / В. Р. Матвиевский. – Москва : Издательство МГИЭМ, 2002. – 113 с.
- 16 Надежность и эффективность в технике : справочник. В 10 т. Т.5 : Проектный анализ надежности / Б. И. Бельчик [и др.] ; под ред. В. И. Патрушева. – Москва : Машиностроение, 1988. – 316 с.
- 17 Надежность и эффективность в технике : справочник. / В 10 т. Т.7 : Качество и надежность в производстве / И. В. Аполонов [и др.] ; под ред. И. В. Аполонова. – Москва : Машиностроение, 1989. – 280 с.
- 18 Надежность и эффективность в технике : справочник. В 10 т. Т.9 : Техническая диагностика / И. М. Синдеев [и др.] ; под ред. В. В. Ключева. – Москва : Машиностроение, 1987. – 352 с.
- 19 Схиртладзе, А. Г. Надежность и диагностика технологических систем : учебник / А. Г. Схиртладзе, М. С. Уколов, А. В. Скворцов. – Москва : Новое знание, 2008. – 518 с.
- 20 Труханов, В. М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения / В. М. Труханов. – Москва : Издательство стандартов, 1995. – 304 с.
- 21 Земляков, И. П. Прочность деталей из пластмасс / И. П. Земляков. – Москва : Машиностроение, 1972. – 160 с. : ил.
- 22 Испытательная техника : справочник. В 2 кн. Кн. 1. / под ред. В. В. Ключева. – Москва : Машиностроение, 1982. – 528 с. : ил.
- 23 Машиностроение : энциклопедия. Т. III-7. Измерения, контроль, испытания и диагностика / В. В. Ключев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Ключева. – Москва : Машиностроение, 1996. – 464 с. : ил.
- 24 Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Ключев [и др.]. – Москва : Машиностроение, 2005. – 656 с.

Учебное издание

Новиков Александр Кузьмич

Испытания надежности и контроль металлополимерных изделий

Конспект лекций

Редактор А.Н. Голубев
Технический редактор Н.Н. Матвеева
Корректор Т.А. Осипова
Компьютерная верстка: А.К. Новиков

Подписано в печать _____ Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная №1.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. лист. _____.
Тираж _____ экз. Заказ № _____.

Учреждение образования "Витебский государственный
технологический университет" 210035, Витебск, Московский пр-т, 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
"Витебский государственный технологический университет".
Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.