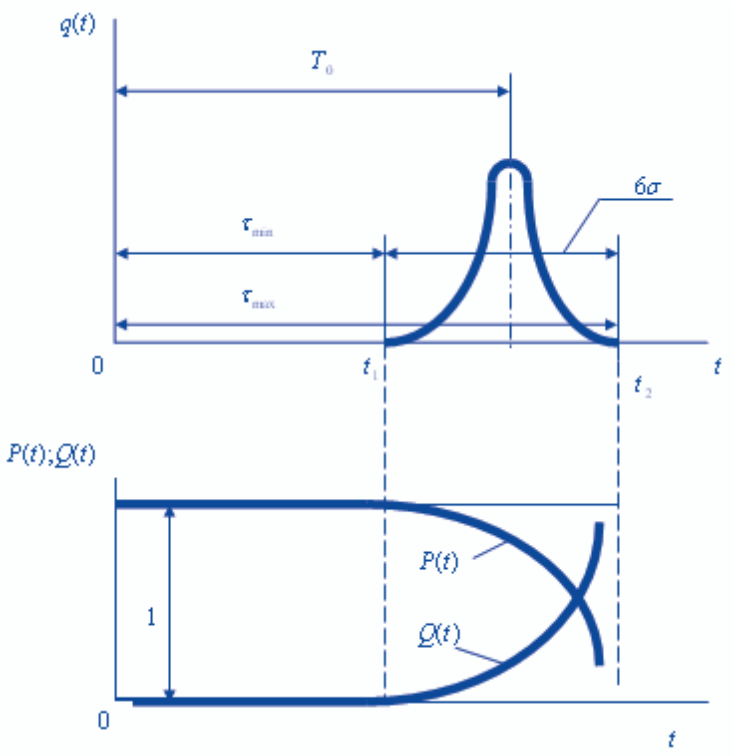
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Р.С. Лучкин

ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ В ТЕХНИКЕ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт машиностроения
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением
и родственные процессы»

Р.С. Лучкин

ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ В ТЕХНИКЕ

Учебное пособие

Тольятти
Издательство ТГУ
2013

УДК 62-192(075.8)
ББК 30.14
Л874

Рецензенты:
д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Сервис технических и технологических систем» Поволжского государственного университета сервиса *Б.М. Горшков*;
канд. техн. наук, доц. Тольяттинского государственного университета *А.Ю. Краснопевцев*.

Л874 Лучкин, Р.С. Проблемы надежности в технике : учеб. пособие / Р.С. Лучкин. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. – 106 с : обл.

Учебное пособие содержит теоретические материалы, позволяющие студентам закрепить полученные на лекционных занятиях знания по основным понятиям теории надежности и ее применению при решении технических задач.

Предназначено для студентов направления 150100.68 «Материаловедение и технологии материалов», магистерская программа «Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов».

УДК 62-192(075.8)
ББК 30.14

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2013

ВВЕДЕНИЕ

В практике проектирования и расчета конструкций оценку надежности обычно выполняют по коэффициентам запаса прочности, допускаемым напряжениям, предельным состояниям. Понятие вероятности неразрушимости пока используют редко.

Вероятностная оценка несущей способности конструкций основана на анализе статистических характеристик действующих нагрузок, механических свойств материалов, с одной стороны, и несущей способности узлов изделий – с другой.

В настоящее время наблюдается переход от классической концепции лапласовского жесткого детерминизма, описывающей причинную обусловленность и подчиненность процессов и явлений действию конкретных законов и рассматривающей вероятность события как меру нашего знания, к современной трактовке вероятности как категории, характеризующей свойства самого объекта. Согласно первой концепции вероятность относилась, как правило, к методу познания, например для рациональной оценки гипотез. Вторая точка зрения основана на понятии вероятности как характеристики объективного мира. Необходимость анализа прочности и ресурса в вероятностном аспекте, то есть надежности конструкций, обусловлена следующими обстоятельствами:

– использование в расчетах необоснованных коэффициентов запаса, приводящих к тому, что изделие получается либо излишне материалоемким и прочным, либо, наоборот, недостаточно прочным. Поэтому вероятностная оценка прочности и ресурса позволяет получить более точную информацию о состоянии конструкции, особенно на этапе эксплуатации;

– вероятностный анализ прочности и ресурса позволяет лучше понять природу прочности данной конструкции, более точно и адекватно оценить влияние внешних и внутренних факторов на исчерпание прочности и ресурса;

– вероятностный анализ прочности и ресурса, проводимый с учетом статистических закономерностей образования и развития дефектности, позволяет обеспечить оптимизацию и достижение необходимого уровня надежности и безопасности эксплуатации.

По мнению ряда специалистов [1], широкому практическому применению подобных методов препятствуют отсутствие необходимого объема исходных статистических данных и неопределенность результатов, связанная с большим разбросом конечных результатов, получаемых различными авторами. Проблема получения точных и достоверных результатов в условиях ограниченности объемов исходных статистических данных – одна из наиболее актуальных в области техники.

Надежность – одна из основных инженерных проблем, которой занимались всегда, с тех пор как появилась техника. Однако зачастую надежность характеризуют чисто качественными критериями: большая, недостаточная, хорошая. Возникают вопросы: что значит «надежность повысилась»? Во сколько раз? Пока надежность оценивают словами «хорошо», «плохо», практически невозможно ни сравнить изделия между собой по надежности, ни оценить эффективность методов повышения надежности, ни выяснить влияние на надежность изделия отдельных узлов, материала, технологии и т. д. Нельзя рассуждать о прочности конструкции вообще – необходимо говорить о прочности в течение данного срока и в данных, как можно более точно оговоренных условиях. Эта оговорка кажется почти формальной, но она имеет очень большое значение, а ее неформальный учет требует многих усилий и серьезных изменений привычных взглядов. Наука о надежности не рассматривает вопросы достижения определенного уровня необходимых параметров изделий (это задача других наук), а изучает процесс изменения этих параметров с течением времени.

В настоящее время предпринимаются попытки построения статистической теории прочности и разрушения твердых тел. Например, предложены простейшие вероятностные модели, описывающие пластическую деформацию в условиях одноосного напряженного состояния как основы статистической теории процесса растяжения; вероятностные методы были использованы для определения пределов текучести поликристаллических тел при сложном нагружении [2].

Основной метод изучения и расчета надежности – статистический, в этом случае при анализе эксплуатационных нагрузок приме-

няется теория случайных процессов, а при решении задач прочности – теория случайных выбросов.

Одним из затруднений при статистическом анализе сложных технических систем классическими методами является разнородность и недостаточное количество исходного статистического материала.

В теоретических и прикладных работах строгие обоснования часто подменяются общими рассуждениями. Например, необходимость и возможность применения статистических методов обосновываются неопределенностью ситуации, многочисленностью и случайностью воздействий, непредсказуемостью результатов и прочими соображениями. При этом совершенно игнорируется то, что рабочий аппарат статистики – теория вероятностей – предполагает статистическую устойчивость исследуемых величин и явлений, чего общие соображения гарантировать не могут, а поскольку статистическая устойчивость не анализируется, то получаемые результаты, вне зависимости от их правильности, нельзя признать научно обоснованными, что особенно неприятно при оценках последствий реализации различных проектов [3].

В настоящее время отсутствует методика расчета конструкций на надежность и долговечность, нет даже общей схемы такого расчета, имеются лишь частные виды расчетов, представляющие собой, по существу, разрозненные этапы комплексного расчета [4]. Многие изделия являются в большинстве случаев малосерийными и вообще уникальными, применение для них обычных методов математической статистики при определении характеристик надежности теряет физический смысл [5]. Можно ли использовать статистические методы, если имеется всего один или несколько сложных объектов? Как определить показатели надежности в начальный период работы изделия? Откуда получать информацию об отказах, если по условиям эксплуатации изделия они не допускаются или допустимая вероятность их возникновения весьма мала [4]? Статистика не дает ответы на эти и другие основные вопросы надежности.

Основные задачи теории надежности: установление закономерностей возникновения отказов; изучение влияния внешних и внутренних факторов на надежность определения количественных характеристик методов оценки и расчета надежности; разработка

методов обеспечения надежности при проектировании и изготовлении; сохранение надежности при эксплуатации.

Перспективным является проведение оценки и исследование запасов прочности в течение определенного отрезка времени, то есть оценка прочности с учетом продолжительности эксплуатации, когда вместо случайных величин необходимо использовать случайные функции.

Для специалистов в области машиностроения получение информации о надежности и долговечности изделий является эпизодическим при отсутствии педагогически продуманной системы обучения. Не всегда учитываются особенности машиностроения, в частности технологических процессов, при производстве изделий, работающих в условиях изнашивания, усталости и т. п.

Теория надежности оперирует случайными величинами наряду с обычными детерминированными. Это требует некоторой перестройки мышления, так как случайная величина представляет собой не обычное число, а вектор в функциональном пространстве в соответствии с заданной для нее функцией распределения [6].

Материалы, изложенные в данном учебном пособии, могут способствовать формированию следующих компетенций, соответствующих Федеральному образовательному стандарту по направлению подготовки 150100 «Материаловедение и технологии материалов»: способность свободно пользоваться специальной лексикой и основной терминологией по направлению подготовки (ОК-3), формулирование новых исследовательских задач на основе возникающих проблем (ОК-7), а также способность владеть базовыми знаниями при теоретическом экспериментальном исследовании материалов и процессов (ПК-1), понимание и самостоятельное использование принципов и методики исследований, испытаний и диагностики веществ и материалов, обладание навыками комплексного подхода к исследованию материалов и технологий их обработки и модификации (ПК-7) и навыками самостоятельного выбора материалов дл заданных условий эксплуатации с учетом требований надежности и долговечности, экономичности и экологических последствий их применения (ПК-10).

Условные обозначения

$П$ – параметр измеряемой контролируемой величины; выходной параметр.

$Y_{Д}$ – детерминированная часть параметра $П$.

$Y_{Н.Д}$ – недетерминированная часть параметра $П$.

n – количество исследуемых изделий (элементов); число циклов нагружения.

τ – время; долговечность.

$f(\cdot)$– законы распределения.

$M[\cdot]$– оператор математического ожидания.

R, r – прочность.

Q, q – нагрузка.

$P(t)$ – вероятность перехода; вероятность безотказной работы.

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов.

1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Машиностроительные материалы, обладая высокими эксплуатационными характеристиками, отличаются значительной изменчивостью физико-механических свойств, существованием в них различных дефектов, неоднородностью состава и структуры.

Любые измеренные величины содержат элемент случайности в силу ее зависимости от множества факторов, формирующих эти величины, а также процесса измерения. Поэтому следует рассматривать величину параметра качества ω как условно состоящую из детерминированной $\omega_{Д}$ и недетерминированной $\omega_{Н.Д}$ частей

$$\Delta\omega = (\Delta\omega)_{Д} + (\Delta\omega)_{Н.Д}.$$

Детерминированная часть, определяемая аналитически, функционально связана с теми факторами собственно изготовления $\sum_{i=1}^{n} a_{Дi}$ и контроля $\sum_{i=1}^{n} b_{Дi}$, которые неслучайным образом обусловливают величину $\omega_{Д}$, т. е. $\omega_{Д} = f_1(\sum_{i=1}^{n} a_{Дi}, \sum_{i=1}^{n} b_{Дi})$. Недетерминированная часть, оцениваемая вероятностно-статистическими методами, характеризуется случайной обусловленностью $\omega_{Н.Д} = f_2(\sum_{i=1}^{n} a_{Н.Дi}, \sum_{i=1}^{n} b_{Н.Дi})$. Интегральная характеристика параметра качественно выражается функционалом [7]

$$\omega = \Phi\left[\omega_{Д}\left(\sum_{i=1}^{n} a_{Дi}, \sum_{i=1}^{n} b_{Дi}\right); \quad \omega_{Н.Д}\left(\sum_{i=1}^{n} a_{Н.Дi}, \sum_{i=1}^{n} b_{Н.Дi}\right)\right].$$

Условность разделения величины параметра качества состоит в том, что невозможно провести четкую, навсегда обусловленную границу между детерминированной и недетерминированной частями. Вместе с тем такое разделение методологически оправдано как с точки зрения анализа результата контроля, так и с точки зрения возможности расчетного обоснования регламентируемых допусков на контролируемые параметры.

Следует отметить, что все процессы являются случайными функциями, для которых характерно рассеивание значений. Расчет надежности изделий и конструкций при их проектировании не обеспечивает объективного и точного прогнозирования надеж-

ности изготовленных изделий, так как в процессе изготовления практически всегда имеют место отклонения (разброс, рассеивание) большинства полученных параметров (прочностные и упругие свойства, плотность материала, прочность и жесткость изделия, геометрические размеры, технологические характеристики, параметры внешних воздействий и др.). Особенно это характерно для таких структурно-неоднородных гетерогенных композиционных материалов, как сварные и паяные соединения.

При эксплуатации изделия, как правило, расчетные значения показателя (прочность, модуль упругости, геометрические размеры и т. д.) существенно отличаются от фактического значения показателя в изготовленном изделии. Оценка влияния этих отклонений на прочность и несущую способность изделия является чрезвычайно важной задачей.

Рассеяние значений параметров конструкций обусловлено:

1) процессами проектирования и изготовления, так как ни один элемент конструкции невозможно изготовить с абсолютно точными геометрическими размерами. Поэтому уже на стадии проектирования назначают соответствующие допуски к номинальным размерам элементов конструкции;

2) технологией производства материалов. В этом случае отклонения свойств материалов вызываются термической и другими видами их обработки. Отклонение физико-механических свойств материалов вызывает изменение их характеристик прочности. В связи с этим при проектировании элементов конструкции на прочностные характеристики также даются соответствующие допуски;

3) условиями эксплуатации. На элементы конструкции действуют нагрузки постоянного и переменного характера. В зависимости от условий эксплуатации они также имеют некоторые расхождения;

4) изменчивостью условий внешней среды. Однотипные конструкции могут эксплуатироваться в различных условиях внешней среды (например, при значительно отличающихся нагрузках). Кроме того, внешние факторы могут оказывать влияние на изменение механических характеристик материалов.

Следует также иметь в виду, что при длительной эксплуатации элементы конструкции могут изменять геометрические размеры в результате износа и других причин. В элементах могут постепенно накапливаться повреждения, которые снижают сопротивление усталости конструкции.

При расчете на прочность элементов конструкций необходимо знать численные значения трех групп данных: нагрузку, действующую на элемент конструкции; геометрические размеры опасного сечения элемента; механические характеристики материала, из которого он изготовлен. Даже для однотипных конструкций численные значения этих параметров имеют расхождения, которые в технических задачах оговариваются соответствующими допусками на номинальный размер.

Экспериментальные исследования пределов текучести, прочности, усталости и других характеристик образцов и деталей свидетельствуют о существенном их разбросе. Важнейшими причинами этого разброса являются следующие: структурная неоднородность металла одной плавки, обусловленная искажениями кристаллической решетки, случайными включениями, порами и т. п.; межплавочное рассеяние механических характеристик, случайные изменения режимов механической и термической обработки, сварки и т. п., разброс размеров, влияющих на механические характеристики (радиусы галтелей, диаметры в зонах посадок, катеты сварных швов и т. п.); случайные отклонения от проектных форм (непрямолинейность стержней, местный изгиб листовых поверхностей и т. п.).

В связи с этим результат расчета на прочность по наименьшим значениям указанных параметров не может быть перенесен на всю партию элементов с достаточной достоверностью без использования характеристик рассеяния численных значений параметров конструкции.

Допустим, что исследуются n изделий, которые характеризуются некоторым параметром $Y(\tau)$ и считаются работоспособными при выполнении условия $Y(\tau) \geq Y_{KP}$ (рис. 1). Совокупность значений времени, при которых параметр $Y(\tau)$ каждого из изделий достигает критического значения Y_{KP}, дает распределение отказов во времени.

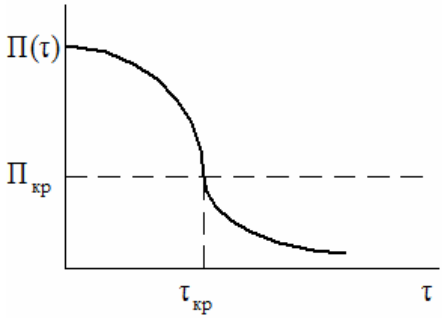


Рис. 1. Реализация функции распределения параметра $Y(\tau)$

В силу различных технологических причин эти изделия в исходном состоянии не будут абсолютно одинаковыми, т. е. каждое i-е изделие будет характеризоваться своим значением $Y_i(\tau)$. Таким образом, уже в исходном состоянии будем иметь некоторое распределение значений параметров Y_0. Вследствие процессов старения будем наблюдать изменение (для определенности – уменьшение) искомого параметра. Очевидно, что каждое из изделий будет стариться совершенно индивидуально в зависимости от $Y(\tau)$, как это показано на рис. 2.

В общем виде совокупность расчетных характеристик изделия в зависимости от его работоспособности может быть определена по следующей формуле [8]:

$$Y = \oint_1 (S_i),$$

где S_i – расчетный параметр материала; i – номер параметра от 1 до n.

Изменчивость расчетного (исходного) параметра материала в изделии

$$k_i = \frac{S_{i\phi}}{S_i},$$

где $S_{i\phi}$ – фактическое значение параметра материала.

При этом k_i может принимать значения как больше, так и меньше 1; так, при $S_i = S_{i\phi}$, $k_i = 1$.

При изменении всех расчетных параметров материала изменчивость прочности или работоспособности изделия может быть определена из зависимости [8]

$$k_{ф} = \frac{Y_{ф}}{Y} = \frac{\oint\limits_{1}(k_i S_i)}{\oint\limits_{1}(S_i)},$$

где $Y_{ф}$ – фактическое значение прочности изделия.

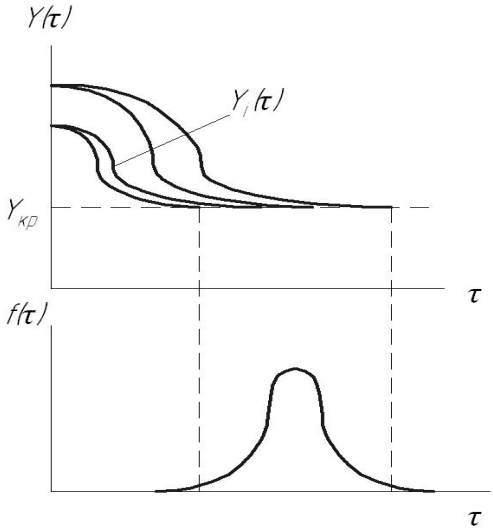


Рис. 2. Реализация функций $П_i(\tau)$

В случае, когда распределение показателей свойств и параметра изделия (жесткость, прочность и др.) является одинаковым и подчиняется нормальному закону Гаусса, а корреляция между ними отсутствует, то отклонение [8]

$$\Delta Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial S_1}\right)^2 \Delta S_1^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial S_2}\right)^2 \Delta S_2^2 + \ldots + \left(\frac{\partial Y}{\partial S_i}\right)^2 \Delta S_i^2}.$$

Таким образом, определяя отклонения показателей свойств материала в изделии, можно определить отклонения параметров изделия. При этом под показателями S_i можно принять любую характеристику материала изделия.

Для исходных случайных величин необходимо задание их законов распределения. Установление законов распределения, допускаемых исходными статистическими данными с выбранным уровнем

доверительной вероятности, представляет наибольшую трудность и практически осуществляется крайне редко. Решение этой задачи возможно лишь путем перебора статистических гипотез о законах распределения наблюдаемых случайных величин [1].

При расчете надежности элементов конструкций кроме числовых характеристик несущей способности необходимо знать ее законы распределения $f_R(r)$, определяемые по результатам испытаний больших выборок, что часто представляет собой весьма сложную техническую задачу. Действительно, неопределенность состояния несущей способности элементов конструкции связана с разбросом прочностных свойств, обусловленным технологией изготовления, рассеиванием геометрических размеров, влиянием эксплуатационных факторов, неопределенностью процессов старения, коррозии, износа.

Главная задача заключается в получении закона распределения срока службы (наработки) на основе анализа закономерностей физических процессов разрушения, отражающих реальные условия, в которых будет работать изделие [4]. На практике обычно приходится выбирать адекватное распределение, не имея достаточного объема данных. Выбор чаще всего основывается на прошлом опыте, но желательно знать конкретный физический механизм явления, приводящего к определенному распределению.

Вид закона распределения существенно влияет на количественные характеристики надежности. В некоторых случаях удается установить тип закона распределения, исходя из физической сущности явлений, протекающих в технических устройствах. Однако во многих случаях вследствие действия неучтенных факторов, непредвиденных нарушений технологических процессов и т. д. происходит искажение теоретического закона распределения. Рассеяние каждого из параметров должно быть описано соответствующими реальной действительности законами распределения с указанием количественных характеристик этих распределений.

Без результатов многократных испытаний бывает трудно определить, какое именно распределение подойдет лучше всего к рассматриваемому явлению. Иногда несколько моделей распределения обеспечивают хорошее соответствие экспериментальных

данных в средней части области случайных величин, однако эти данные могут сильно отличаться в области больших отклонений. В теории надежности основное внимание обычно сосредоточивается на необходимости обеспечения высокой надежности, т. е. наибольшего значения, при оценке которого, к сожалению, в расчете рассматриваются именно удаленные от середины участки распределения. Существует много статистических критериев согласия, которые помогают выбрать теоретическое распределение к экспериментальным данным. На практике обычно имеется ограниченный объем результатов испытаний, поэтому выбор модели распределения лучше производить на основе опыта, приобретенного в аналогичных случаях.

При исследовании прочности материалов обычно используют два основных типа распределения – нормальное и Вейбулла; логарифмически нормальное распределение часто используют при описании разброса данных усталостных испытаний. В зависимости от решаемой задачи и критерия отказа применяют и другие виды распределений.

Учитывая, что недостаточность значения нагрузки определяется многими факторами, согласно центральной предельной теореме можно применить допущение о нормальности распределения нагрузки.

Для описания структурной неоднородности материала предлагается использовать плотность распределения микронапряжений и аппроксимировать эту плотность нормальным законом. Можно показать, что решающую роль на вид выражения для определения времени до разрушения оказывает зависимость дисперсии микронапряжений s^2 от действующего макронапряжения σ.

При циклическом и других режимах нагружения, когда нагрузка изменяется во времени, очень важным является установление закона распределения поглощенной энергии по объему материала. Знание этого закона позволило бы определять параметры кривых усталости аналогично статическому нагружению. В этом случае наряду с законом распределения микронапряжений решающую роль играет закон распределения поглощенной энергии по объему материала, которая расходуется на преодоление внутреннего сопротивления и концентрируется прежде всего в местах сосредоточения дефектов.

Такие механические характеристики металлических материалов, как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость, распределяются по нормальным законам.

Многие специалисты в области надежности технических систем считают, что характеристики несущей способности элементов систем подчиняются нормальному закону распределения (рис. 3).

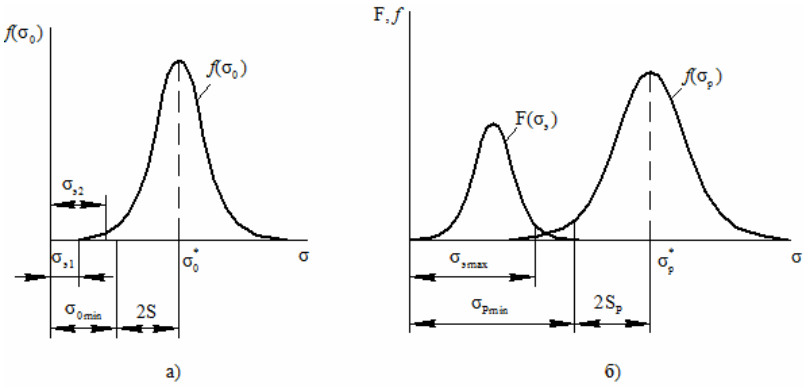


Рис. 3. Законы распределения предела выносливости (*а*) и сопротивляемости хрупкому разрушению σ_P и максимального напряжения $\sigma_Э$ (*б*)

Пусть параметром, имеющим рассеяние по нормальному закону, является механическая характеристика, например предел выносливости σ_0 (рис. 3,*а*), в то время как нагрузка $\sigma_Э$, отнесенная к сечению, остается строго постоянной. Разным принятым при проектировании сечениям соответствуют различные уровни напряжений $\sigma_{Э1}$, $\sigma_{Э2}$, которые будут давать различную вероятность разрушимости. Значение предела выносливости может быть задано либо в виде математической зависимости $f(\sigma_0)$, либо в виде числа σ_{0min}, взятого, например, на расстоянии $2S$ от среднего значения σ^*_0. В последнем случае отношения $\frac{\sigma_{0\min}}{\sigma_{Э1}}$ и $\frac{\sigma_{0\min}}{\sigma_{Э2}}$ могут формально рассматриваться как коэффициенты запаса, соответствующие различным вероятностям неразрушимости (или разрушимости).

В другом примере (рис. 3,*б*) механическая характеристика σ_P – сопротивляемость хрупкому разрушению сварного или паяного соединения при низкой температуре имеет закон $F(\sigma_P)$. Пиковые максимальные нагрузки дают распределение максимальных напряжений $\sigma_Э$ в виде $F(\sigma_Э)$. За счет выбора различных сечений элементов конструкций можно изменить положение кривой $F(\sigma_Э)$ без изменения ее формы. Если минимальное значение σ_{Pmin} задать как отстоящее от σ^*_P на $2s_P$, а максимально возможную расчетную нагрузку также задать в виде числа, которое при каком-то значении сечения дает $\sigma_{Эmax}$, то $\sigma_{Pmin}/\sigma_{Эmax}$ будет восприниматься как коэффициент запаса, отдельные значения которого соответствуют различной вероятности разрушимости.

Нормальное распределение используют для оценки нагрузок, близких к стационарным.

Нормальный закон – двухпараметрический: один параметр – математическое ожидание, второй – среднеквадратическое отклонение. Часто используют коэффициент вариации.

Обычно рассматривают варианты взаимного распределения нагрузки и прочности, приведенные на рис. 4:

1) нагрузка и прочность имеют произвольные законы распределения (рис. 4,*а*);
2) распределенная величина нагрузки ограничена двусторонними фиксированными пределами прочности (рис. 4,*б*);
3) предел прочности задан фиксированной величиной при статистическом распределении нагрузки (рис. 4,*в*).

Если кривые распределения нагрузки и прочности, распределенные по нормальному закону с математическими ожиданиями m_1, m_2 и средними квадратическими отклонениями σ_1, σ_2 пересекаются, появляются области, где приложенные нагрузки могут превысить допустимую прочность (рис. 4,*а*).

В связи с малым количеством изделий, выделяемых на испытания, или ограничением сроков, отводимых на разработку изделия, не всегда с достаточной степенью достоверности можно определить математические ожидания и средние квадратические отклонения нагрузки и прочности.

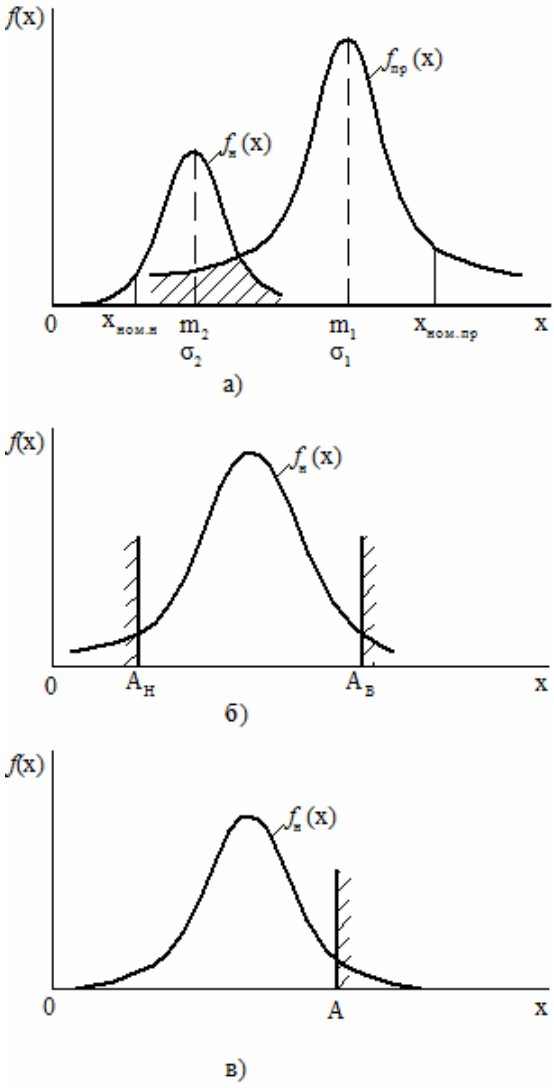


Рис. 4. Основные варианты распределения нагрузки (н) и прочности (пр)

Известные правила математической статистики позволяют использовать имеющийся экспериментальный материал и заменить значения m и σ во всех случаях их выборочными оценками $\bar{x}$ и s при условии, что эти оценки статистически независимы. Если нагрузка

и прочность распределены по нормальному закону, то оценка запасов работоспособности

$$P = F\left(\frac{E_R - E_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}\right), \qquad (1.1)$$

где E_R, E_Q – математические ожидания прочности и нагрузки; σ_R^2, σ_Q^2 – дисперсии прочности и нагрузки; F – нормированная нормальная функция распределения, определяемая по таблицам.

Основной интерес в расчетах на прочность представляют максимальные значения нагрузок и минимальные значения прочностей, которые располагаются на «хвостах» плотности распределений с очень малыми вероятностями.

Следует заметить, что на практике пользоваться законом распределения выходного параметра как результирующей характеристикой эффективности функционирования системы неудобно. Лучше использовать какие-либо простые числовые характеристики закона распределения этой случайной величины. Причем сами эти характеристики должны иметь понятный физический смысл, а количество их не должно быть большим, так как иначе они в совокупности потеряют наглядность и будут неудобны. Такой основной числовой характеристикой является среднее значение выходного эффекта системы $E = M[\Phi_X]$ (здесь $M[\cdot]$ – оператор математического ожидания).

При нормальном распределении случайной величины она может принимать любые значения от -∞ до +∞, а отрицательных значений механические характеристики (предел прочности, предел текучести и др.) не имеют. Поскольку возможные значения механических характеристик могут быть только положительными, то распределение этих параметров будет в большинстве случаев лишь усеченным нормальным [7]:

$$f(\Pi) = \frac{C}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(Y - \overline{Y})^2}{2\sigma^2}\right], \quad 0 \le Y < \infty, \qquad (1.2)$$

где $\overline{Y}$ – среднее значение параметра; σ^2 – дисперсия; C – нормирующий коэффициент.

Важно отметить, что обычно справедливо условие $\overline{Y} \ge 3\sigma$, тогда с погрешностью порядка десятых долей процента и меньше можно считать $C = 1$.

При достаточно больших выборках переменных значения, далеко отстоящие от среднего, должны появляться обязательно. Поэтому правило «трех сигм» следует, по мнению В.М. Гороховского [3], «...рассматривать не как право на отбрасывание соответствующих членов выборки, а как предупреждение о возможной ее неоднородности и необходимости внимательного изучения условий, в которых получены «выскакивающие» значения».

Часто применяемые в расчетах теоретические законы распределения несущей способности и действующих нагрузок имеют область задания от -∞ до +∞ (например, нормальный закон), тогда как и несущая способность, и действующие нагрузки не могут быть отрицательными. В этом случае законы распределения необходимо усечь слева в нуле (рис. 5) [9].

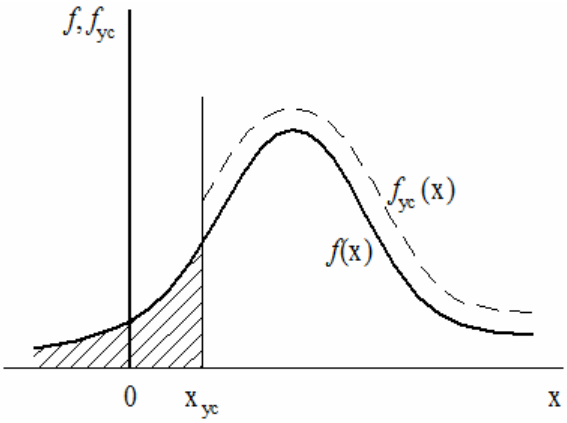


Рис. 5. Плотность распределения неусеченного и усеченного слева законов

Усечение слева закона распределения действующей нагрузки уменьшает надежность. Одновременное усечение слева законов распределения несущей способности и действующих нагрузок может привести к увеличению или уменьшению надежности, но может и не повлиять на нее. Если же закон распределения несущей способности усечен слева, а действующей нагрузки – справа, то это всегда будет приводить к увеличению надежности [9].

Имеются работы, где статистические данные аппроксимируются асимметричными законами распределения; в этом случае применение нормального распределения приводит к существенному завышению характеристик надежности.

Достоинством нормального закона распределения является то обстоятельство, что линейные комбинации случайных величин, подчиняющихся нормальным законам распределения, имеют также нормальный закон распределения.

В случаях, когда изменения нагрузки и механических характеристик металлических материалов имеют резко выраженный асимметричный вид или сравнительно большой разброс, нормальное распределение использовать нельзя, а рекомендуется использовать распределение Вейбулла, логарифмически-нормальное распределение или распределение Шарлье.

Недостаток нормального закона – асимптотическое продолжение его в область отрицательных значений случайной величины, в то время как многие случайные величины, например прочность материала, могут быть только положительными.

Основной числовой характеристикой нормального закона распределения является среднее значение исследуемого выходного параметра системы $E = M[\Phi_X]$ (здесь $M[\cdot]$ – оператор математического ожидания). Однако, по мнению В.М. Гороховского [3], «...бессмысленно использовать в расчетах среднее значение некоторого параметра только потому, что он описывается нормальным законом распределения вероятностей, или среднее геометрическое, если закон распределения – логнормальный, и, исходя из этого, получать доверительные интервалы для реакций объекта. Эти попытки должны обязательно предваряться содержательным анализом задач, из которого только и может выясниться теоретическая обоснованность их решения с помощью той или иной модели и способы подбора расчетных параметров».

По закону Вейбулла распределены характеристики прочности и пластичности (относительное удлинение и сужение, ударная вязкость). Объяснение природы прочности и пластичности конструкционных сталей с позиций теории дислокаций приводит к представлению о распределении их механических свойств, ана-

логичном распределению минимальных членов выборки, т. е. к закону Вейбулла.

Распределение Вейбулла является весьма удобным и эластичным при обработке опытных данных по отказам, если отсутствует физическая модель явления, а также в большинстве неответственных случаев, где не требуется высокая точность прогноза надежности.

Для простоты расчетов на практике для $f_R(r)$ применяют закон Рэлея как частный случай закона Вейбулла. Однако закон Рэлея является однопараметрическим, и коэффициент вариации $A_R = 0{,}5$. Поэтому его применение дает заниженную оценку надежности объектов с $A_R < 0{,}5$.

Так как для экспериментальных данных характерны значительные асимметрия и эксцесс для кривой распределения, то из двухпараметрических распределений лучше использовать логарифмически нормальное (например, распределение числа циклов до разрушения хорошо описывается усеченным логарифмическим нормальным законом [10]).

Экспоненциальный закон – это констатация, статика явлений, и его применение допустимо и оправдано при расчете и анализе надежности систем, уже обладающих высокой безотказностью для любой системы отказов [4]. Экспоненциальное распределение широко используется для оценок надежности элементов, подверженных действию «внезапных» отказов, а также часто из-за формальных достоинств. Этот закон позволяет весьма просто определять вероятность безотказной работы изделия $P(t) = e^{-\lambda t}$ в зависимости от одного параметра – интенсивности отказов λ.

Применение экспоненциального закона, как известно, резко упрощает все расчеты, особенно при анализе надежности сложных систем. Однако следует всегда иметь в виду, что распространение этого правила на области с большими значениями $t >> R$ (R – период непрерывной эксплуатации изделия, т. е. ресурс) может привести к грубым ошибкам и неправильным выводам [4].

Требование экспоненциальности законов, как правило, не является существенным ограничением по двум причинам. Во-первых, если рассматриваемый интервал нормальной эксплуатации системы не слишком велик и на нем можно пренебречь старением

составляющих элементов, то упомянутое требование выполняется. Во-вторых, в условиях явного старения какой-то части элементов системы использование допущения об экспоненциальном законе распределения их наработок на отказ ведет к оценке надежности технической системы с запасом.

Но данный закон нельзя применять для случаев прогнозирования поведения систем при повышении ресурса и для оценки мероприятий, необходимых для повышения надежности за пределами значений принятого ресурса.

2. ПОНЯТИЕ «НАДЕЖНОСТЬ». ЗАДАЧИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

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

В более узком понимании надежность представляет собой меру сохранности необходимых свойств конструкции или объекта и способности противостоять случайным факторам разного рода, нарушающим эти свойства [11]. Таким образом, понятие надежности связано со случайной природой параметров, характеризующих работоспособность объекта.

Теория надежности позволяет устанавливать закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности изделия, рассматривать влияние внешних и внутренних воздействий на процессы, обусловливающие появление отказов, создавая общие методы анализа и расчета надежности и прогнозирования отказов, разрабатывать способы повышения надежности при конструировании и изготовлении изделий, а также способы обеспечения надежности при эксплуатации, определять методики сбора, учета и анализа статистических данных, характеризующих надежность.

Как известно, теория надежности может быть построена на различных основаниях, причем определяющим является способ связи надежности системы с надежностью ее отдельных элементов. Эта связь может быть либо логической, либо функциональной.

Математическая модель надежности – это определенное математическое выражение, связывающее значения физических параметров системы, действующих нагрузок и вероятности безотказной работы системы. Математических моделей надежности может быть несколько даже для одной и той же системы. Вид модели определяется тем, что включается в понятие «состояние системы», т. е. что считается компонентами вектора состояния. Кроме того, необходимо отдельно разрабатывать модели для различных элементов системы, где действуют различные нагрузки и поэтому оператор перехода может быть разным. Это же касается и различных пери-

одов работы системы (начальный период, период нормальной эксплуатации, период разрушения).

В ряде случаев можно бы и отказаться от попыток истолкования процессов, происходящих в системе, чтобы не сделать задачу непосильно сложной. В частности, при построении математических моделей надежности систем возможно применение модели «черного ящика» (системы, устройство которых и происходящие в них процессы неизвестны), заимствованной из кибернетики. Изучение такой системы осуществляется путем исследования реакций системы на внешние нагрузки. Таким образом, не вникая в суть происходящих в системе процессов, изучают особенности изменения вектора состояния в зависимости от вида и уровней воздействующих факторов. Такой принцип часто применяют при использовании модели «слабейшего звена».

Основные задачи теории надежности – установление закономерностей возникновения отказов; изучение влияния внешних и внутренних факторов на надежность; определение количественных характеристик методов оценки и расчета надежности; разработка методов обеспечения надежности при проектировании и изготовлении; сохранение надежности при эксплуатации – принципиально могут решаться двояко.

Первый путь основан на изучении статистических закономерностей появления отказов множества однотипных устройств. При этом отказы рассматривают как некоторые отвлеченные случайные события, а многообразные физические состояния элементов и устройств сводят в основном к состояниям работоспособности и неработоспособности, которые представляют функциями надежности.

Второй путь основан на изучении физико-химических свойств и параметров элементов технических устройств, происходящих в них физико-химических процессов, приводящих к отказу, при этом текущие состояния элементов и систем описывают уравнениями, отображающими физические закономерности.

На каждом из этапов решений возникают свои специфические математические, инженерно-математические, экономико-математические, физико-математические задачи. Решения основных задач позволяют выявить зависимости ресурса от конструктивных,

технологических и эксплуатационных факторов (рис. 6) и создают возможность для решения других задач, в частности для выбора оптимальных параметров изделия, оптимальных режимов эксплуатации и технического обслуживания и т. п.

Рис. 6. Виды надежности [13]

Для обоснования конструирования и оценки технических изделий и элементов очень важно тщательное изучение их свойств. Исследования природы возникновения отказов связаны с оценкой изменения свойств материалов в зависимости от длительности их пребывания в определенных условиях эксплуатации. На этой стадии важны не только результаты исследований и их статистическая обработка, но и создание математических моделей тех физико-химических процессов, которые протекают в материалах и приводят к отказам.

На этапе проектирования и изготовления опытных изделий возникает ряд математических задач, среди которых следует выделить расчет надежности технического изделия по надежности его компонент; оценку надежности изделия по испытаниям малого числа образцов; выбор оптимальной конструкции из ряда возможных; установление наиболее рациональных условий работы изделия в эксплуатации [13].

На этапе проектирования вначале необходима приближенная оценка разработанных вариантов с целью выбора наиболее подходящего, в последующем – более точная, позволяющая отработать выбранный вариант по критерию надежности и оценить (прогнозировать) его надежность при заданных режимах и окружающих условиях. Эти оценки должны производиться по схемам, моделям, макетам и опытным образцам чаще всего расчетным путем и по существу являются прогнозированием, поскольку не может быть точного соответствия предполагаемой обстановки реальной.

При проектировании механических элементов и систем одним из требований является обеспечение заданной в техническом задании надежности при минимальной массе конструкции. Для этого необходимо количественно оценивать надежность элементов механической системы и оптимально «распределять» заданную надежность между элементами системы с учетом их несущей способности и массы.

На этапе изготовления изделий возникают задачи управления их качеством – установление оптимальных режимов технологического процесса, составление планов испытаний изделий на надежность, проверка качества изделий, оценка полученного уровня надежности.

Этап эксплуатации изделий выдвигает большое число новых проблем: определение планов оптимальных сроков профилактических осмотров и замена узлов (или элементов), разработка методов поиска неисправностей; определение оптимальных сроков эксплуатации изделий, обработка данных об отказах, в результате которой определяются реальные показатели надежности в конкретных условиях, и др.

3. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость в отдельности или сочетание этих свойств как изделия в целом, так и его элементов.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение заданного времени или заданной наработки. Определяющей особенностью свойства безотказности является непрерывное сохранение работоспособности в течение заданного времени.

В стандарте «Надежность в технике. Термины» показателей надежности и долговечности 14. Из них 9 показателей сравнительно просто могут быть выражены в общем виде при помощи математических формул. К этим показателям относятся гамма-процентный ресурс, наработка на отказ, средняя наработка до первого отказа, среднее время восстановления, коэффициент готовности, коэффициент технического использования, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, параметр потока отказов.

Остальные 5 показателей в общем виде затруднительно выразить при помощи математических формул. К этим показателям относятся ресурс, назначенный ресурс, срок службы, срок гарантии и гарантийная наработка.

Показатели «ресурс» и «срок службы» имеют много общего, так как они определяются одним и тем же предельным состоянием. Однако они и существенно отличаются друг от друга, так как срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации до предельного состояния, а ресурс – это наработка до предельного состояния. Очевидно, что при одном и том же ресурсе может быть различный срок службы в зависимости от интенсивности эксплуатации изделий.

Наработка, ресурс, срок службы и др. являются непрерывными случайными величинами, число возможных значений которых, очевидно, бесконечно.

Надежность изделия количественно оценивают с помощью системы показателей с учетом особенностей изделия, условий его

эксплуатации и последствий отказов. Значения показателей надежности объекта могут изменяться на различных стадиях его создания и эксплуатации, что связано с уровнем качества этих стадий, классификации персонала и т. п. [5].

Так как в настоящее время не накоплено еще достаточно данных об отказах сварных и паяных узлов и конструкций, то для определения характеристик их надежности необходимы специальные методы, например использование информации об изменении статистических характеристик случайных процессов выходных параметров соединений и узлов при воздействии эксплуатационных факторов.

В существующих руководствах надежность элементов характеризуется тремя основными величинами:

$P(t)$ – вероятность безотказного действия в течение времени t;

$f(t) = -\dfrac{dP(t)}{dt}$ – плотность вероятности;

$\lambda(t) = \dfrac{f(t)}{P(t)}$ – интенсивность отказов.

Эти характеристики связаны между собой определенными соотношениями, и, казалось бы, любая из них равноправно может быть использована для оценки надежности элементов. Однако это далеко не так.

Испытания и эксплуатационные наблюдения показали, что интенсивность отказов изменяется во времени немонотонно (рис. 7).

В общем случае можно выделить три периода жизни изделий j-й группы: приработка (I), эксплуатация (II) и износовые явления (III).

Ресурсные испытания и эксплуатация показывают, что в большинстве случаев $\lambda(t)$ изменяется во времени немонотонно. После начального периода приработки наступает относительно длительный этап, когда $\lambda(t) \approx \text{const}$. Затем вследствие изнашивания, старения, накопления повреждений и других процессов $\lambda(t)$ возрастает. Когда интенсивность отказов достигает некоторого уровня, дальнейшая эксплуатация нецелесообразна.

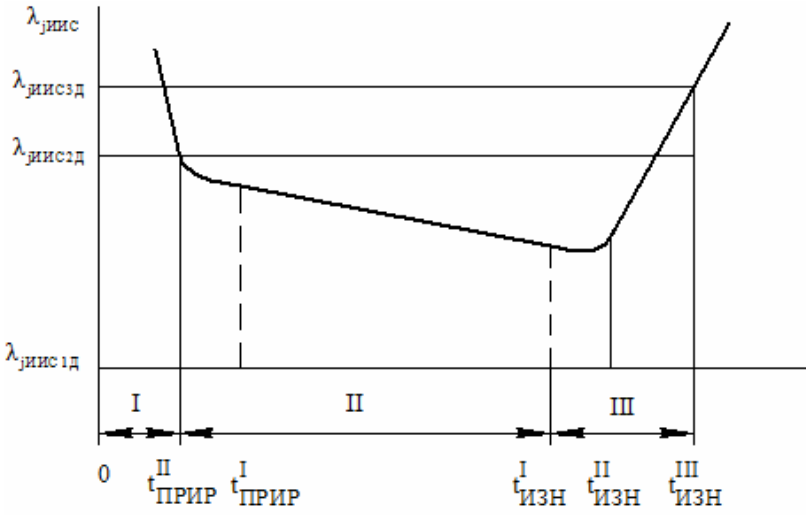


Рис. 7. Типичная λ-характеристика

Как известно, $\lambda \approx \text{const}$ соответствует случаю, когда время предшествующей работы изделия не влияет на вероятность его отказа в данный промежуток времени, т. е. для схемы только внезапных отказов. Такое положение неоправданно идеализировано. Все изделия изнашиваются, стареют, и вероятность их безотказной работы с течением времени снижается. Постепенные отказы имеют неравномерную интенсивность λ и начинают проявляться примерно в середине периода нормальной эксплуатации, затем их интенсивность возрастает и образуется поток отказов с параметром $\lambda_{\Pi}(t) = \text{const}$.

Интенсивность отказов определяется как

$$\lambda = \frac{dq}{dt}\frac{1}{p} = \frac{dq}{dt}\frac{1}{(1-q)},$$

где p – вероятность отсутствия отказов; q – вероятность отказов; при $q \to 0$

$$\lambda \cong \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{d(\Delta x)}\frac{d(\Delta x)}{dt}.$$

Представим избыточность Δx как

$$\Delta x = (\bar{x}_{кр0} - \Delta x_{кр}) - (x_{p0} + \Delta x_p),$$

следовательно,

$$d(\Delta x) = -d(\Delta \bar{x}_{кр}) - d(\Delta x_p).$$

Изменение $\Delta\bar{x}_{кр}$ может происходить только вследствие внутренних изменений в материале, например изменения состава из-за диффузии отдельных составляющих или испарения отдельных компонентов, изменения структуры при действии радиоактивных излучений и т. д. Изменение Δx_p происходит вследствие физико-химических процессов (коррозии и т. п.), вызывающих уменьшение рабочего сечения или рабочей толщины материала, появление дополнительных напряжений при действии температуры, ускорений и других факторов. Так, в случае, когда на изменение механической прочности основное влияние оказывает, например, коррозия

$$\Delta\bar{x}_{кр} \approx 0, \text{ а } \Delta x_p = \Delta p = p_{p0}\,\Delta S/S_0.$$

Тогда

$$x_p = \frac{P}{S_0 - \Delta S} \approx \frac{P}{S_0}\left(1 + \frac{\Delta S}{S_0}\right) = p_{p0} + \Delta p,$$

где P – приложенное усилие; S – начальная площадь сечения рассматриваемой части элемента. Изменение сечения ΔS подчиняется зависимости

$$\Delta S = c_0 \exp(-K/T) t^{\gamma} \approx c_1 \exp(\alpha\Delta\theta)\, t^{\gamma},$$

следовательно,

$$\Delta x_p = c_2\, e^{\alpha\Delta\theta}\, t^{\gamma},$$

где $c_2 = c_1(P_{po}/S)$; $d(\Delta x_p)/dt = -d(\Delta x_p)/dt = \gamma c_2\, e^{\alpha\Delta\theta}\, t^{\gamma-1}$; $\Delta\theta$ – приращение температуры.

Таким образом, интенсивность отказов элементов, вызванная этим процессом, определяется приближенно как

$$\lambda \approx \left\{\frac{\gamma_{c2}}{\sigma_M\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(x_p - \overline{x_{пр}}\right)1^2}{2\sigma_M^2}\right]\right\} e^{\alpha\Delta\theta} t^{(\gamma-1)} = a'' e^{\alpha\Delta\theta} t^{(\gamma-1)},$$

или $\lambda = \lambda_0\, e^{\alpha\Delta\theta}$, где $\lambda_0 = a_{от}\, t^{(\gamma-1)}$ при $\gamma = 1$; $\lambda_0 = a_{от}$ выражение в фигурных скобках есть $a_{от}$.

Если имеется k физико-химических процессов, вызывающих отказы, то вероятность отказов имеет вид: $q_{\Sigma} = q_1 + q_2 + ... + q_k$. Часто q_j для многих из физико-химических процессов, протекающих в изделии, при заданных условиях настолько мало, что им можно пренебречь (т. е. $q_{d+1} = ... = q_k \approx 0$), следовательно, можно считать, что вместо

$$\frac{dq_{\Sigma}}{dt} = \frac{dq_1}{dt} + \frac{dq_1}{dt} + ... + \frac{dq_k}{dt} \cong \lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + ... + \lambda_k$$

справедливо

$$\lambda_{\Sigma} \cong \lambda_1 + \lambda_2 + ... \lambda_d.$$

Рассматривая основные физико-химические процессы, вызывающие отказы, можно найти для них зависимости

$$\lambda_{\Sigma}/\lambda_0 = f(\theta, P, ..., z, ...).$$

В тех случаях, когда определяющую роль в развитии повреждений играют термофлуктуационные процессы, можно принять, что [2]

$$\lambda = \left\{ \tau \exp\left[\frac{U}{RT}\left(1 - \frac{q}{q_*}\right)\right]\right\}^{-1}, \qquad (3.1)$$

где τ – временная константа; U – энергия активации разрушения; R – универсальная постоянная; T – абсолютная температура; q – нагрузка; q_* – критическое значение нагрузки, при котором происходит мгновенное разрушение.

Доказано, что для однократного нагружения интенсивность отказов равна вероятности разрушения $v(1)$ [5]. Действительно,

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N(t)\Delta t}; \quad v(1) = \sum_{\Delta t}^{t} \frac{n_i}{N_0},$$

где Δt – интервал времени (одно нагружение); $v(1)$ – вероятность отказа за одно нагружение.

Если N_{i-1} – число исправно работающих изделий в начале интервала времени Δt, N_i – число исправно работающих изделий в конце интервала времени Δt, то

$$N_{i-1} = N_i = N_0 = N(t).$$

Для однократного нагружения [5]

$$\sum_{\Delta t} n_i = n(t); \quad \Delta t = 1.$$

После преобразований получаем, что интенсивность отказов λ равна вероятности отказов при однократном нагружении, т. е.

$$\lambda = \frac{n(t)}{N(t)\Delta t} = \sum_{\Delta t} \frac{n_i}{N_o} = v(1).$$

Тогда [5]

$$P(t) = e^{-vt_i} = \exp(-vL_i),$$

где L_i – число нагружений за время t_i.

Во многих работах особое внимание уделяют оценке интенсивности отказов $\lambda(t)$. Это объясняется, по-видимому, двумя причинами. Во-первых, предполагается, что вероятность безотказной работы $P(t)$ является экспоненциальной функцией времени:

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

В таком случае λ – независимая от времени величина и может быть непосредственно использована для расчета надежности. Например, вероятность безотказной работы устройства однократного действия, состоящего из ℓ элементов, определялась бы как

$$P(t) = \prod_{i=1}^{i=\ell} P_i(t) = \exp\left(-t\sum_{i=1}^{i=\ell}\lambda_i\right).$$

Во-вторых, значительная часть сведений о надежности элементов получена путем сбора и последующего усреднения статистических данных об отказах элементов в процессе эксплуатации изделия.

Однако систематические данные показали, что в действительности $\lambda(t)$ является, как правило, функцией времени (рис. 8) и поэтому не может быть непосредственно использована для расчета надежности сложных изделий. Для такого расчета необходимо определить $P_i(t)$, что связано с интегрированием функции $\lambda_i(t)$ по времени.

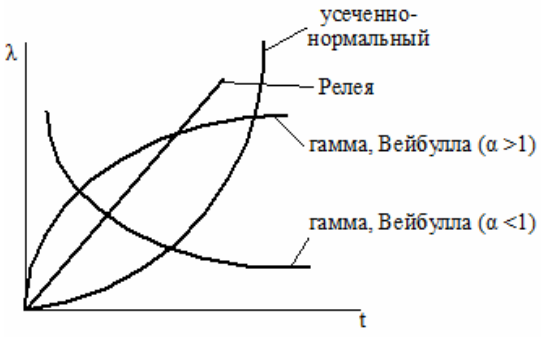


Рис. 8. Зависимость интенсивности отказов от времени

На практике величина λ определяется приближенно как

$$\lambda = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot n},$$

где Δn – количество элементов, вышедших из строя в течение времени от t до $t + \Delta t$; n – число элементов, работающих к моменту t.

При этом утрачиваются сведения о величинах n, N (размер выборки), τ_{min} (минимальное значение срока службы в данной серии испытаний), а следовательно, затрудняется оценка достоверности результатов. Кроме того, вообще достоверность определения $\lambda(t)$ сравнительно невелика. Точное значение $\lambda(t)$ может быть получено только при $N \to \infty$ и $\Delta t \to 0$. При ограниченной выборке N интервал Δt нельзя брать слишком малым, и поэтому определяются не точные, а усредненные по интервалу Δt значения λ. Величина Δn в отдельные малые интервалы Δt будет испытывать статистические колебания, и поэтому должен наблюдаться большой разброс значений λ, определенных в последовательные промежутки Δt.

Учитывая все сказанное выше, следует признать, что $\lambda(t)$ не может быть рациональной характеристикой надежности элементов, обеспечивающей достаточно простой расчет надежности изделий.

Нетрудно убедиться, что наиболее рациональной характеристикой надежности является вероятность безотказного действия элементов $P(t)$. Вычисление функции надежности – вероятности безотказной работы изделия (рис. 9) на заданном отрезке времени является основной задачей теории надежности [13]. Большинство других показателей связаны с функцией надежности простыми соотношениями.

Эта характеристика позволяет непосредственно производить расчет надежности изделий однократного действия по соотношению, справедливому при любом законе распределения сроков службы:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \ldots P_\ell(t) = \prod_{i=1}^{i=\ell} P_i(t).$$

Вероятность безотказной работы можно определять как вероятность того, что на отрезке времени $[0, T]$ выходной параметр изделия будет находиться в допустимой области D:

$$P(t) = P\{Y(t) \in D, t \in [0, T]\}.$$

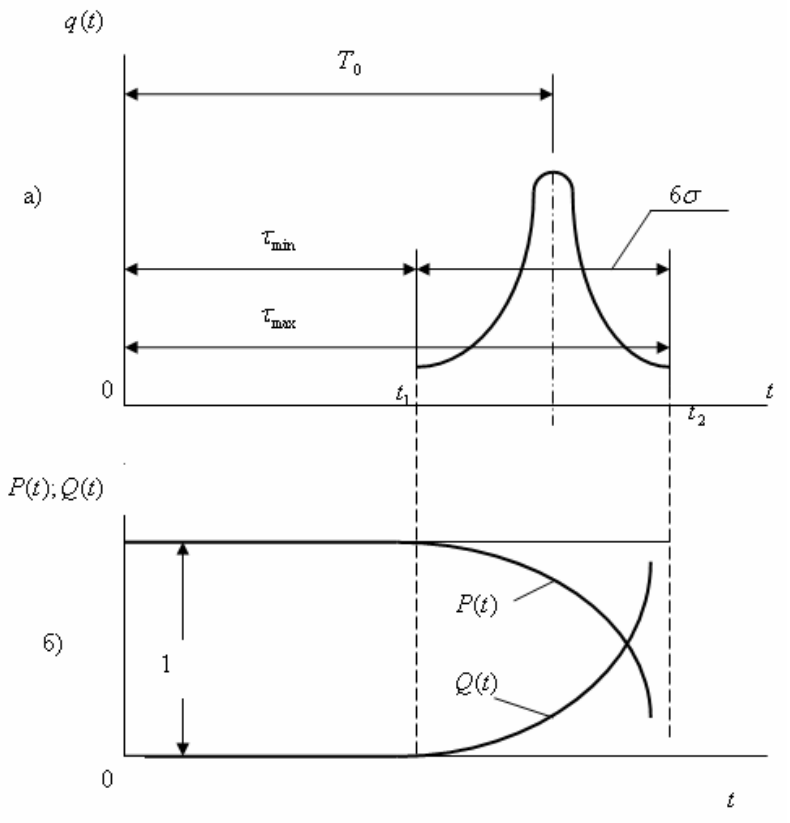


Рис. 9. Характеристики нормального закона: распределения:
а – кривая плотности распределения вероятности отказов;
б – надежность $P(t)$ и ненадежность $Q(t)$

Пусть по техническим условиям допускается $Y \le Y^*$, где Y^* – предельное значение параметра. Тогда вероятность безотказной работы рассматриваемой совокупности элементов находим по формуле

$$P(t) = P\{Y \le Y^*\} = \int_{-\infty}^{Y^*} f(Y,t)\, dY . \qquad (3.2)$$

Предположим, что плотность распределения параметра Y соответствует нормальному закону. В этом случае уравнение (3.2) принимает вид:

$$P(t) = F_0\left(\frac{Y - \alpha_0(t)}{\alpha_1(t)}\right),$$

где F_0 – функция Лапласа, а параметры $\alpha_0(t)$, $\alpha_1(t)$ в данном случае имеют смысл математического ожидания и среднего квадратического отклонения.

В параметрических моделях надежности очень часто вычисление вероятности безотказной работы элементов технических устройств сводится к нахождению вероятности превышения (непревышения) одной случайной величиной другой случайной величины. В частности, в параметрической модели «нагрузка – прочность» вероятность безотказной работы

$$P = Bep(R - Q > 0), \tag{3.3}$$

где R – обобщенная прочность; Q – обобщенная нагрузка.

Когда нагрузка и прочность представляют собой независимые случайные величины, соотношение (3.3) принимает вид

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} G(x) f(x) dx, \tag{3.4}$$

где $f(x)$ – плотность распределения прочности; $G(x)$ – функция распределения нагрузки.

Вероятность распределения резерва прочности S можно записать в виде

$$P_S(S) = \int_{\infty}^{S} P_S(S) dS, \tag{3.5}$$

где $P_S(S)$ – плотность распределения вероятности резерва прочности (рис. 10).

Площадь графика $P_S(S)$ на отрезке S от 0 до $+\infty$ равна интегральной вероятности распределения положительного резерва прочности и вероятности безотказной работы, т. е. конструктивной надежности:

$$P = \int_{0}^{\infty} P_S(S) dS\,. \tag{3.6}$$

Площадь графика на отрезке S от $-\infty$ до 0 равна интегральной вероятности распределения отрицательного резерва прочности, т. е. вероятности отказов конструкции:

$$V = \int_{-\infty}^{0} P_S(S) dS = P_S(0)\,, \tag{3.7}$$

что соответствует условию

$$S < 0. \tag{3.8}$$

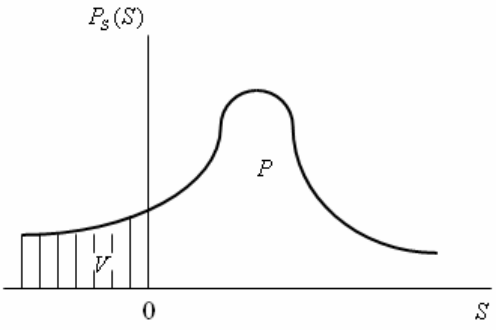


Рис. 10. График плотности распределения вероятности резерва прочности

В настоящее время надежность технических устройств оценивается путем умножения показателя качества системы на вероятность безотказной работы. Такая расчетная схема очень проста, но недостаточно корректна, поскольку сам показатель качества непосредственно зависит от характеристик системы. Вероятность безотказной работы вычисляется на основе весьма грубой модели системы, не учитывающей внутренние взаимосвязи в схеме устройства. Расчет надежности в принятой в настоящее время форме позволяет лишь оценить возможную работоспособность устройств по имеющимся статистическим данным об отказах элементов.

Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Для невосстанавливаемых изделий понятия долговечности и безотказности практически совпадают.

В простейшей ситуации, когда изделие эксплуатируют до первого отказа, отождествляемого с предельным состоянием, безотказность работы одновременно характеризует и долговечность [13].

Наработка – продолжительность или объем работы изделия, может измеряться в единицах времени, массы, длины, площади, объема, в циклах и т. д.

Ресурс – наработка изделия от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние. Ресурс является основным показателем

долговечности изделия. Основным является индивидуальный остаточный ресурс – продолжительность эксплуатации от данного момента времени до достижения предельного состояния [13].

Ресурс элементов можно описывать различными законами. Кроме того, следует учесть, что процессы исчерпания ресурса элементов более или менее коррелированны между собой. Различные комбинации законов распределения ресурсов элементов приводят к тому, что закон распределения заранее неизвестен [7].

Срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Срок службы (средний, медианный, гамма-процентный, до первого среднего или капитального ремонта, межремонтный, до морального износа, до списания) является основным показателем долговечности изделий.

Расчеты при определении характеристик надежности элементов целесообразно проводить в следующей последовательности [5].

1. Анализ работоспособности объекта и формулировка критерия отказа. Первый этап заканчивается представлением функции работоспособности изделия в виде

$$\psi(X, t) = R(X, t) - S(X, t) \geq 0,$$

где $\psi(X, t)$ – функция условия работоспособности изделия за время t; $R(X, t)$ – случайные функции несущей способности (сопротивляемости, прочности); $S(X, t)$ – случайные функции нагрузки.

2. Анализ действующих на изделие нагрузок $S_i(X,t),\ i=\overline{1,n}$. При этом определяются вид функции $S(t)$ вид закона распределения $f_S(s)$ в сечении случайного процесса $S(t)$, числовые характеристики случайной величины S_0 (математическое ожидание m_{S_0}, среднее квадратическое отклонение σ_{S0}, коэффициенты вариации A_{S_0}, асимметрии A_{kS_0} и эксцесса $Э_{kS_0}$), изменение числовых характеристик во времени $m_S(t)$, $\sigma_S(t)$, $A_S(t)$, значения параметров закона распределения $f_S(s)$ и изменение их во времени.

3. Анализ несущей способности изделия $R_j(X,t),\ j=\overline{1,I}$. Как и в п. 2, определяются вид функции $R(t)$, закон распределения $f_R(r)$, числовые характеристики случайной величины R_0, функции $m_R(t)$,

$\sigma_R(t)$, $A_R(t)$, значения параметров закона распределения $f_R(r)$, вид функции $\varphi(t)$ несущей способности $R(t) = R_0\varphi(t)$.

4. Исследование корреляционной связи между нагрузкой $S(t)$ и несущей способностью $R(t)$. На этом этапе определяются вид и значения параметров связи $r = a(t)$.

5. Расчет характеристик надежности изделия. Вероятность отказа изделия находится различными методами. Основными моделями являются представление нагрузок и несущей способности случайными величинами или случайными функциями в предположении независимости нагрузки S и несущей способности R.

6. Анализ полученных характеристик надежности изделия. На этом этапе производится сравнение полученных характеристик надежности изделия с требуемыми, исходя из эффективности и безопасности работы, делаются выводы о надежности изделия, намечаются мероприятия по повышению надежности изделия в случае, если она не соответствует предъявляемым требованиям.

4. ОТКАЗЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Отказ является частным случаем повреждения, которое означает событие, заключающееся в нарушении исправности изделия или его составных частей при сохранении работоспособного состояния. Повреждение может быть незначительным или значительным. Первое означает нарушение исправности при сохранении работоспособности, второе – отказ изделия. Некоторые незначительные повреждения могут переходить в категорию значительных и тем самым приводить к отказу объектов. Наиболее общей причиной повреждений первого типа является функциональное изменение параметров и характеристик элементов во времени, обусловленное происходящими в них физико-химическими процессами.

Возникновение отказа обязательно связано с появлением функционального дефекта. Однако не всякий дефект означает возникновение отказа. Существует много таких нефункциональных дефектов, при которых объект может продолжать выполнение своих функций. Эти дефекты не требуют принятия немедленных мер и могут быть устранены при наступлении первого перерыва в работе или при очередном ремонте.

Элемент считается отказавшим, если выполнено условие отказа:

$$S_y = H_\Sigma - H(0) = \int_0^t v(t)dt; \quad H_\Sigma = H(t) + H(0),$$

где S_y – суммарная величина изменения выходного y-элемента до предельного допустимого значения; $v(t)$ – скорость изменения параметра; $H(0)$ – эксплуатационный допуск на обратимые изменения параметра; H_Σ – суммарный эксплуатационный допуск на обратимые и необратимые изменения выходного параметра элемента.

При проектировании и инженерном расчете руководствуются требованием, согласно которому в конструкции не должно возникать состояние отказа:

$$\sigma_P(t) - \sigma(t) \geq 0,$$

где σ_P – прочность материала, выраженная в тех же единицах, что и напряжение σ; t – время.

Наряду со случайными отказами имеются отказы закономерные. Следовательно, определение показателей надежности, основанное только на вероятностно-статистических понятиях, является неполным и неточным.

В ближайшие годы преимущественно будут развиваться методы прогнозирования надежности на основе физики отказов и возрастет роль технологии для создания работоспособных машин и приборов. Кроме того, если до последнего времени основное внимание уделялось отказам функционирования, то в настоящее время основным объектом исследований становятся параметрические отказы [6]. Физика отказов (или физическая надежность) является в настоящее время разделом науки о надежности. Физика отказов должна отвечать на следующие вопросы: почему в данной ситуации произошел отказ? когда он может произойти в данном режиме и условиях? какие меры надо принять, чтобы его избежать? Физика надежности является основой инженерной надежности.

Предмет исследования физики отказов – установление причинно-следственных связей, определяющих существо процессов, которые приводят к отказам в изделиях. Цель этих исследований – выработка мер по подавлению причин, вызывающих отказы. Основным понятием в физике отказов является физико-вероятностная модель отказа, отражающая развитие во времени процесса, приводящего к отказу (механизм отказа), с учетом заданных режимов и условий.

Круг вопросов, которыми должна заниматься физика отказов, очень широк: исследование причин и развития отказов каждого конкретного типа изделия, основанное на фундаментальных законах механики, физики и химии, определяющих принцип его действия, структуру и кинетику процессов; разработка общих методов оценки и прогнозирования надежности изделий; поиск общих положений и обобщенных моделей отказов, позволивших бы выработать единый подход к оценке показателей надежности; диагностика отказов и их предвестников и многие другие.

Физика отказов настолько сложна, что еще не полностью завершен даже первый этап расчетов – отыскание закономерностей процесса разрушения материалов. Лишь для таких процессов разрушения, как усталость, и для некоторых простейших видов изна-

шивания и коррозии имеются закономерности, описывающие протекание процесса во времени [4].

В настоящее время ощущается необходимость в систематизации и уточнении физических и логических оснований ряда широко используемых распределений наработки на отказ, и в частности физической долговечности технических систем. Целесообразно также сконструировать более общие модели возникновения отказов, содержащие как известные, так и новые семейства распределений.

Следует учитывать возможность наложения различных закономерностей развития отказа изделия. С этой точки зрения реализация отказа – результат сочетания нескольких процессов, описываемых соответствующей композицией распределений [7].

Выделяют следующие группы дефектов: конструктивные, технологические, эксплуатационные, накапливающиеся необратимые изменения (старение).

В соответствии с этим рассматривают различные схемы возникновения отказов:

– схема мгновенного повреждения, когда величина фактической нагрузки S_{Φ} в момент времени $t_{ОТК}$ превышает $S_{Д}$ для данной конструкции;
– схема накапливающихся изменений;
– схема релаксации (скачкообразное изменение состояния, вызванное постепенным накоплением повреждений);
– схема действия нескольких независимых причин.

В настоящее время существует довольно обширная классификация отказов. О.И. Молдаванов [7] предлагает выделять следующие самостоятельные группы объектов анализа отказов:

– по месту проявления, например, основной металл, сварные швы, зона термического влияния сварного соединения;
– по причине возникновения – ошибки проектирования и расчета, нарушения правил изготовления и эксплуатации изделия и др.;
– по характеру проявления – постепенный, скачкообразный;
– по последствиям проявления – значительные, связанные с большими потерями продукта, простоем системы и материальными затратами, и незначительные;
– по способу устранения – простые, сложные.

Отказы в период эксплуатации являются событиями, случайными по моменту возникновения, но имеют вполне определенные причины, связанные с разбросом неконтролируемых параметров материала и деталей или вызванные воздействиями внешней среды. Принадлежность отказа к той или иной стадии «жизненного цикла» изделия определяет природу отказа, задачи и методы его исследования: на стадии приработки – отсеять недоброкачественные детали; на стадии эксплуатации – выяснить причину отказа, чтобы впредь ее не допустить; на стадии деградации – выявить процесс развития (механизм) отказа, что позволит найти способы увеличения ресурса, ускоренные методы оценки надежности и т. д. При эксплуатации и испытаниях элементов на надежность имеется возможность контроля рабочих параметров и их работоспособности, т. е. можно зафиксировать как плавные, так и скачкообразные их изменения. Поэтому при эксплуатации и испытаниях элементов, в принципе, нет необходимости подразделять отказы на постепенные и внезапные [2].

Классификационным признаком, уточняющим подход к исследованию и построению моделей, является характер отказов, согласно которому они делятся на катастрофические и параметрические.

При катастрофических отказах изделие полностью теряет работоспособность и дальнейшее его функционирование становится невозможным. Они могут быть как внезапными, так и постепенными в эксплуатационный период и только постепенными – на конечном этапе жизненного цикла изделия. В зависимости от внешних признаков катастрофические отказы разделяют на явные (прочностные), при которых нарушается целостность изделия, и неявные (функциональные), при которых при внешней (видимой) целостности нарушаются условия функционирования.

Выходы параметра изделия за заданные нормы называются параметрическими отказами, которые со временем могут развиваться в катастрофические. В ряде случаев отказ элемента происходит не сразу после выброса параметра, а в результате нескольких кратковременных выбросов с малой амплитудой.

Как катастрофические, так и параметрические отказы проявляются на всех стадиях «жизненного цикла». На стадии эксплуатации все отказы непредсказуемы. Как и все случайные величины,

они могут быть изучены только методами теории вероятностей и математической статистики. На конечной стадии как катастрофические, так и параметрические отказы вызываются естественными процессами разрушения материалов и изделий.

В зависимости от природы процессов разрушения отказы классифицируются на деградационные и износовые. Деградационные отказы вызываются естественным снижением качества материалов и деталей с течением времени (старение, окисление и т. п.); износовые – процессами, связанными с условиями эксплуатации (механический и электрический износ и т. д.).

Наибольшее значение для анализа работоспособности имеет характер проявления отказов. Это объясняется следующим. Во-первых, по характеру проявления отказа чаще всего можно судить о причине его возникновения, которая в большинстве случаев предопределяет и характер развития отказа. Во-вторых, соответствующее проявление отказа обусловливает ту или иную значимость последствий, определяющих цену отказа [7].

Характер проявления отказа зависит от того, каким образом происходит развитие отказа, обусловленное закономерным изменением состояния и параметров всех составляющих элементов. Выход из строя элементов механических систем в основном происходит либо в результате постепенного изменения рабочего параметра (например, допуска на износ), либо из-за внезапного отказа. Таким образом, оценивая общую надежность элемента, следует учитывать составляющие распределения вероятности безотказной работы для постепенных и скачкообразных отказов. Данная классификация не исключает, однако, общей закономерной основы развития обоих типов отказов [7].

Строгое решение задачи сравнительной оценки надежности можно получить при одновременном учете как постепенных, так и внезапных отказов. На рис. 11 показана наиболее общая модель для оценки надежности некоторого элемента механической системы, учитывающая совместное влияние вероятностей безотказной работы от износовых $P_{И}(t)$ и внезапных $P_{В}(t)$ отказов. При независимости влияния рассматриваемых воздействий общая вероятность безотказной работы определяется формулой

$$P(t) = P_{П}(t)P_{В}(t).$$

Считают, что вероятность одновременного появления двух и более отказов очень мала и при расчете надежности ею можно пренебречь.

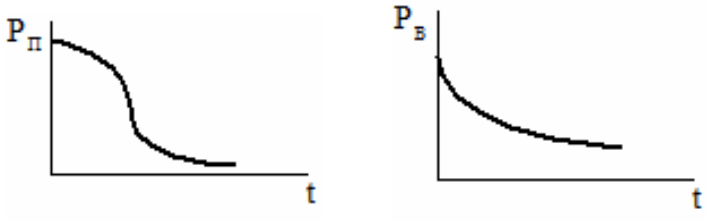


Рис. 11. Общая схема оценки надежности

Однако оценка надежности схем на основании результатов расчета надежности только по отношению к внезапным отказам может привести к существенным ошибкам, так как при этом не учитываются постепенные изменения параметров комплектующих элементов.

Принято считать, что большая часть скачкообразных отказов является следствием разброса действительных значений прочности элементов. Для исследования механизма процессов и оценки работоспособности с учетом величин нагрузок можно воспользоваться моделью «слабейшего звена», когда система, состоящая из узлов и элементов, представлена в виде цепи, состоящей из отдельных звеньев, неравнопрочных по отношению к воздействующим нагрузкам. Если нагрузка в определенный момент времени превысит прочность одного (слабейшего) или нескольких элементов, то цепь разрывается, что соответствует отказу системы в целом. У «слабых» элементов имеются всякого рода скрытые дефекты. В реальных эксплуатационных условиях в таких элементах быстро накапливаются необратимые изменения, которые «внезапно» приводят к отказу [7]. Таким образом, вероятная наработка на отказ изделия в целом будет определяться вероятной наработкой до отказа его «слабейшего» участка [7].

Постепенные отказы, носящие плавный характер, в большинстве своем связаны с естественным старением, износом, усталостью материала элементов. В конечном счете выходные параметры одно-

го из элементов технической системы могут достигнуть критических значений, исключающих дальнейшую эксплуатацию изделия.

Построение в общем виде блок-схемы возникновения отказа (рис. 12) позволяет подойти к построению модели его возникновения [4].

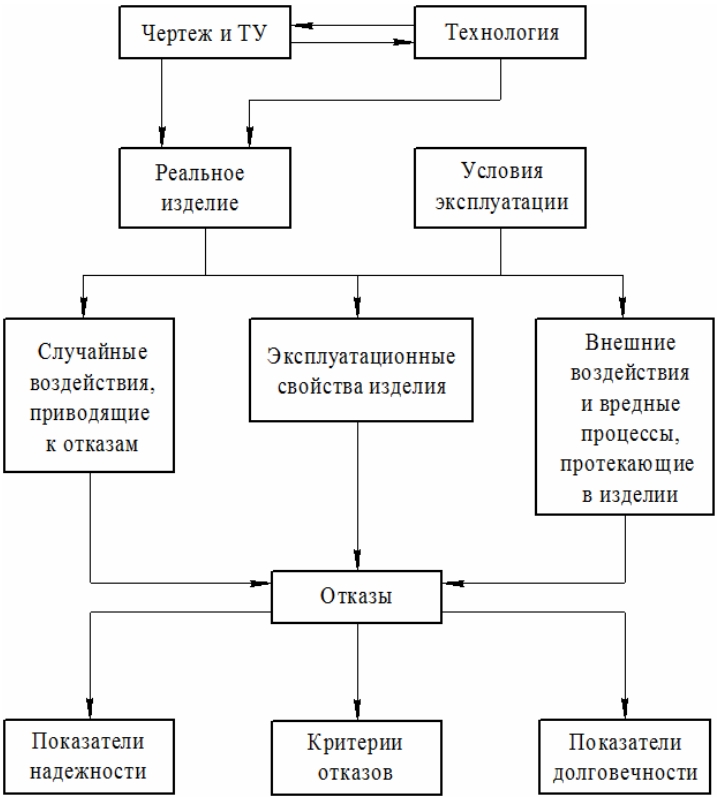


Рис. 12. Блок-схема возникновения отказов

В любом случае проявления отказа его развитие представляет сложный функциональный процесс изменения во времени всех конструктивно-технологических параметров. Для инженерного анализа процессов развития отказов необходимо выразить совокупность конструктивно-технологических факторов (характеризующих

уровень качества) каким-либо комплексным функциональным параметром. В этом случае временное изменение такого параметра при эксплуатации позволит судить о характере развития отказа [7].

Модель отказа конструкций представляет зависимость запаса прочности изделия от внешних факторов, нагрузки и времени. При этом надо учитывать всю информацию, полученную в результате анализа отказов, а также по возможности и априорную, которая включает сведения об отказах и механизмах их развития в аналогичных, ранее исследованных изделиях; предположительный вид и характер возможных процессов, протекающих в изделии; значения феноменологических коэффициентов процессов, протекающих в материалах и на границах разделов (для используемых материалов); уравнения кинетики процессов.

В силу специфики производства начальная прочность (прочность на момент времени t_0) является величиной случайной и может быть распределена по различным законам. Для установившейся технологии и при условии, что нет грубых отклонений от нее, как правило, это распределение близко к нормальному. Нагрузка также может быть величиной случайной. Как только нагрузка превысит прочность, наступит отказ. Разность между действительным значением прочности и действующей нагрузкой есть запас прочности.

Если считать, что прочность и нагрузка распределены по нормальным законам, то вероятность отказа

$$Q = \int_{-\infty}^{0} f(\Delta x)d\Delta x = \Phi\left[\frac{x-y}{\left(\sigma_x^2+\sigma_y^2\right)^{1/2}}\right],$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{z}\exp\left(-\frac{1}{2}\xi^2\right)d\xi$; $\Delta x = x - y$ – запас прочности; x – прочность; y – нагрузка; σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения распределения прочности и нагрузки соответственно. Условие отказа $\Delta x \le 0$.

В результате протекания различного рода физико-химических процессов запас прочности со временем будет изменяться. Плотность распределения отказов

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{d\Delta x}\frac{d\Delta x}{dt} = f(\Delta x)\frac{d\Delta x}{dt},$$

где $f(\Delta x)$ – начальное распределение запаса прочности; $d\Delta x/dt$ – скорость изменения запаса прочности. В общем случае $\Delta x(t) = \varphi(kT)$, здесь k – константа скорости процесса, T – температура. Параметры распределения функции изменения запаса прочности определяются параметрами распределения запаса прочности и процесса деградации.

При изменении внешних условий будет происходить изменение k. Если процесс можно описать законом Аррениуса, то

$$k = A \exp(-E_a/RT),$$

где A – постоянная; E_a – энергия активации процесса; R – газовая постоянная, а время до отказа

$$i_{CP} = C \exp E_a/RT,$$

где $C = \varphi^{-1}(\overline{\Delta x})/A$; $\overline{\Delta x}$ – средний запас прочности.

Если $f(\Delta x)$ и $d(\Delta x_i/\mathrm{dt})$ определены для каждой составляющей, существенно влияющей на прочность, то вероятность безотказной работы всего изделия можно представить в следующем виде:

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^{n} \int_{t}^{\infty} f_i(\Delta x_i) \frac{d\Delta x_i}{dt} dt,$$

где $f_i(\Delta x_i)$ – плотность распределения i-й составляющей запаса прочности; Δx_i – i-я составляющая запаса прочности.

Интенсивность отказов

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i,$$

где

$$\lambda_i = \frac{\alpha_i}{1 - \alpha_i Q_i(t)} \frac{dQ(t)}{dt},$$

а α_i – вероятность наличия дефекта.

5. ЛИНЕЙНАЯ ГИПОТЕЗА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Известно, что реальный процесс функционирования системы сопровождается закономерным накоплением и развитием повреждений в элементах конструкции. Характер накопления и развития повреждений обусловлен, в частности, конструктивно-технологическими особенностями технической системы и условиями ее эксплуатации. В реальных условиях число накапливающихся повреждений, а также последовательность их появления и характер развития – случайные факторы и их статистические характеристики связаны с функцией надежности системы (рис. 13).

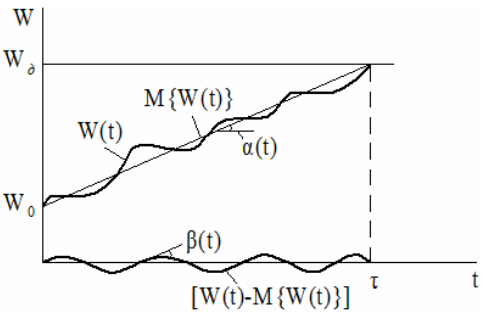


Рис. 13. Процесс изменения параметра при накоплении повреждений

К настоящему времени предложено несколько критериев, применяемых для описания разрушения как необратимого процесса накопления повреждений. Наиболее часто применяется критерий Бейли, в основу которого положен принцип суммирования парциальных разрушений. Предполагая, что доля долговечности, расходуемая в любой отрезок времени, независима от предыдущего нагружения и температуры, Бейли предложил условие разрушения для случая дискретного изменения напряжения σ в виде соотношения от времени *t*, когда напряжение на отдельных интервалах времени остается постоянным, изменяясь только при переходе от одного интервала к другому [1]:

$$\sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i)} = 1, \qquad (5.1)$$

где Δt_i – время действия напряжения σ_i; $\tau(\sigma_i)$ – долговечность при данном напряжении σ_i.

Исследования показали, что критерий Бейли не всегда дает хорошую сходимость с экспериментальными данными. В связи с этим были предложены различные модификации этого условия.

Процессы разрушения материалов сводятся в основном к постепенному росту деформаций, увеличению существующих дефектов, зарождению и развитию трещин, т. е. происходит постепенное накопление локальных дефектов вследствие необратимого характера последовательных единичных нарушений. Таким образом, основной критерий (условие) разрушения заключается в том, что при изменяющемся во времени напряжении – произвольной последовательности напряжений σ_i, каждому из которых соответствует долговечность $\tau(\sigma_i)$ и время действия каждого напряжения Δt_i, разрушение произойдет тогда, когда сумма относительных уменьшений долговечности станет равной единице.

При напряжении, которое является непрерывной функцией времени $\sigma(t)$, условие разрушения примет вид [1]

$$\int_0^{t_P} \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1, \qquad (5.2)$$

где t_P – время до разрушения; $\sigma(t)$ – временной режим нагружения; $\tau[\sigma(t)] = Ae^{-\alpha\sigma(t)}$ – долговечность материала при данном нагружении.

Условия (5.1) и (5.2) характеризуют принцип наложения или суммирования парциальных разрушений, то есть отдельные локальные разрушения суммируются вплоть до предельного состояния, когда трещина достигает критической величины и происходит разрушение образца.

Значение потери ресурса

$$\Pi = \sum_{i=1} t_i \tau_i^{-1} ,$$

где τ – долговечность.

Полное разрушение происходит, когда $\Pi = 1$. Для линейной гипотезы функция повреждаемости Π обладает свойством аддитивности:

$$\Pi(0, t + t_1) = \Pi(0, t) + \Pi(t, t_1),$$

т. е. повреждаемость, накопленная за время $t + t_1$, складывается из величин повреждаемости, накопленных за отдельные промежутки времени.

При случайной нагрузке, действующей на элемент конструкции, $П(t)$ – нестационарный процесс; каждая реализация этого процесса – монотонно не убывающая функция, которая независимо от характера приложения нагрузки начинается из нулевой точки.

Ошибки при оценке долговечности по формулам (5.1) и (5.2) возможны вследствие структурной неоднородности материала.

Одно из спорных следствий из линейного правила суммирования повреждений состоит в том, что мера повреждений при базовых испытаниях увеличивается по линейному закону. Это не согласуется с непосредственными наблюдениями различных процессов, таких как изнашивание, усталость, коррозия и т. п. [10].

В практических расчетах используется линейный закон суммирования повреждений [5]

$$\sum_{i=1}^{r} \frac{t_i}{t_{раз}[\sigma_i, T_i]} = 1, \qquad (5.3)$$

где $t_{раз}$ – время разрушения, соответствующее напряжению σ_i (эквивалентное напряжение при сложном напряженном состоянии) и температуре T_i i-го цикла нагружения.

Процессы накопления повреждений в конструкции могут быть рассмотрены на основе теории марковских случайных процессов, а также теории надежности систем с накоплением нарушений. С физической точки зрения второй путь предпочтительнее, поскольку в его основе содержится допущение о том, что появление нарушения (в данном случае – повреждения) не вызывает немедленного отказа системы [7].

Необходимо учитывать, что процесс накопления локальных повреждений в общем случае протекает с различной (во время эксплуатации изделия) интенсивностью [7].

По мере роста числа циклов в процессе усталостного разрушения идет постепенное накопление усталостных повреждений. Когда их число оказывается достаточно большим, равным некоторому числу N, наступает разрушение. Обозначим через N_k число циклов, необходимых для накопления k единичных усталостных повреж-

дений. Поскольку последние возникают в случайные моменты времени, N_k является случайной величиной. Переходы в системе предполагаются возможными только из предыдущего состояния в последующее, т. е. по схеме [3]:

$$N_0 \to N_1 \to \ldots N_k \to \ldots \to N_n.$$

Для перехода из состояния N_{k-1} в состояние N_k необходимо некоторое дополнительное число циклов $\Delta N_k = \gamma_k h(N_{k-1})$.

Тогда

$$N_k = N_{k-1} + \Delta N_k,$$

где γ_k – некоторая случайная величина, которая характеризует интенсивность накопления повреждений (вероятность перехода); $h(N_{k-1})$ – заданная функция величины N_{k-1}.

Если принять [3]

$$h(N_{k-1}) = N_{k-1}/\lambda,$$

где $\lambda = \text{const}$, то

$$\gamma_i = \lambda \Delta N_i / N_i.$$

Из общей теории надежности известно, что уравнение [3]

$$P^1(t) = -\lambda P(t) \qquad (5.4)$$

соответствует случаю, когда вероятность возникновения повреждения за время от t до $t + \Delta t$ может быть представлена в виде

$$\gamma(\Delta t) = \lambda \Delta t \,.$$

Через $P(t)$ обозначена вероятность отсутствия повреждения за время $0 - t$. По аналогии с (18) [3] можно записать

$$\partial P(N) / \partial N = -\lambda P(N) / N \,,$$

что приводит к решению [3]

$$P(N) = \exp\left(- \int_0^N \lambda dN / N \right) = \exp(-\lambda \lg N) \,,$$

или плотность вероятности [3]

$$f(N) = \lambda \exp(-\lambda \lg N) / N \,.$$

Тогда элемент вероятности

$$f(N) dN = \lambda \exp(-\lambda \lg N) dN / N \,.$$

Переходя к логарифмическим координатам времени, получаем [3]:

$$f(N) / dN = \lambda \exp(-\lambda \lg N) d \lg N,$$

что означает показательное распределение логарифма количества циклов. Вероятность отсутствия повреждений на участке от N_1 до N_2 может быть вычислена по формуле [3]

$$P(N_1, N_2) = \exp[-\lambda(\lg N_2 - \lg N_1)] = \exp[-\lambda\lg(N_2/N_1)],$$

что приводит к дифференциальной функции условного распределения (при условии, что в момент N_1 не было разрушения)

$$f_{N_1}(N_2) = \lambda(N_1/N_2 \exp[-\lambda\lg(N_2/N_1)].$$

Введем переменную $u = N_2/N_1$, тогда

$$f_{N_1}(u) = \lambda \exp(-\lambda\lg u)u,$$

следовательно, имеем [3]:

$$f_{N_1}(u)du = \lambda \exp(-\lambda \lg u)(1/u)du = \lambda \exp(-\lambda \lg u)\mathrm{d}\lg u.$$

Таким образом, случайная величина

$$\lg u = \lg(N_2 / N_1) = \lg N_2 - \lg N_1$$

имеет показательное распределение [3].

Переходя к логарифмической шкале времени $\lg N$, имеем возможность представить общее время жизни как [3]

$$Z = \lg N = \lg N_1 + (\lg N_2 - \lg N_1) + (\lg N_3 - \lg N_2) + \ldots + (\lg N_n - \lg N_{n-1}),$$

где случайная величина

$$\lg N_i - \lg N_{i-1} = \lg(N_i / N_{i-1}) = \lg u$$

имеет показательное распределение и величины $\lg u_i$ независимы. В этом случае можно применить теорему Ляпунова, из которой следует, что сумма этих случайных величин имеет распределение, близкое к нормальному [3]

$$f(\lg N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{-\frac{(\lg N - a)^2}{2S^2}},$$

где $a = \mathrm{M}(\lg N)$; $S = \sqrt{D(\lg N)}$.

Поскольку [3]

$$f(N) = f(\lg N)|dZ/dN|,$$

то плотность вероятности N можно представить как [3]

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{-\frac{(\lg N - a)^2}{2S^2}} \frac{1}{N}.$$

Распределение с такой плотностью является логарифмически нормальным.

В расчетах металлоконструкций на усталостную долговечность широкое распространение получила линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений. Согласно этой гипотезе за меру повреждения принимают относительную величину n_i / N_i (здесь n_i – число циклов, при которых возникает усталостное повреждение конструкций (повреждающие циклы); N_i – циклическая долговечность, определяемая по кривой усталости на уровне напряжений σ_i). Если процесс нагружения состоит из i уровней напряжений, то предельное значение усталостных повреждений оценивают по линейному закону накопления относительных повреждений:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{n_i}{N_i} = a = 1. \qquad (5.5)$$

Справедливость линейной гипотезы суммирования повреждений для сварных образцов проверена экспериментально в ИЭС им. Е.О. Патона.

Если предположить, что рассеяние числа циклов до разрушения N является в основном случайным, то используют представление процесса накопления повреждений как марковского процесса или процесса с сильным перемешиванием. При этом естественны следующие предположения о характере процесса накопления повреждений:

– монотонность, т. е. необратимость накапливаемых повреждений;
– однородность приращений процесса в пространстве его состояний;
– неоднородность приращений процесса во времени.

Детали машин, элементы и соединения конструкций – распределенные системы, в которых, как правило, поля напряжений, деформаций и температур неоднородны. Поэтому накопление повреждений протекает в различных точках неодинаково, так что меры повреждений – функции не только времени, но и координат. Возможно, что более практичным является другой путь – развивать не полуэмпирические, а структурные модели, которые явным образом описывают явления, происходящие в структуре материала при его повреждении [10].

С учетом физического процесса разрушения сварное или паяное соединение можно представить как статистический ансамбль большого числа первичных элементов, каждый из которых в той или иной мере является ответственным за прочность соединения в целом. Под действием механических напряжений происходит постепенное разрушение этих элементов. От появления первых пластических деформаций и до момента полного разрушения усталостное повреждение представляет собой случайный процесс. Число и свойства единичных элементов, из которых состоит сварное или паяное соединение, в общей совокупности можно охарактеризовать лишь при помощи некоторого распределения вероятностей. Развитие сдвигов и трещин при каждом последующем цикле также подчиняется некоторому распределению вероятностей и зависит от распределения вероятностей, достигнутого в результате предыдущих циклов. В силу этого процесс усталостных повреждений можно трактовать как случайный процесс марковского типа с непрерывным множеством состояний и дискретным временем. Вероятностные характеристики такого процесса к концу (k+1)-го цикла выражаются через характеристики k-го цикла и некоторые переходные вероятности, зависящие от механизма процесса и нагрузки (k+1)-го цикла.

В.И. Феодосьев [15] отмечает, что предположение о линейности накопления повреждений является упрощающим. Известно, что для любого элемента технической системы долговечность является резко выраженной функцией напряжений и определить ее в пределах обычной технической погрешности, конечно, невозможно. Теория линейного накопления повреждений имеет ограниченное применение, она позволяет достаточно точно определить долговечность детали при нестационарных режимах, где все амплитуды превышают σ_{-1} и отсутствуют резкие всплески нагрузок.

6. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Физический подход к оценке надежности получил наибольшее развитие только в 70-е годы XX века. Было установлено, что следует рассматривать как статистическую, так и функциональную надежность изделия, при этом в последнем случае понимают свойственные изделию детерминистские (физические) закономерности, отказ определяли как соответствующие соотношения между воздействием на изделие и накопленной в нем энергией [11]:

$$k(T) = k_0 \exp(-C_П/T) = k_{01}\, T^q \exp(-C_П/T), \qquad (6.1)$$

где k_0, k_{01} – множители, характеризующие свойства процесса; $C_П$ – обобщенная энергия процесса; q – показатель влияния температуры на процесс; T – абсолютная температура.

Оценка параметров физической модели отказов только на основании физико-теоретических соображений невозможна, так как некоторые параметры физических моделей в настоящее время известны приближенно, а сами модели неточны. Оценку этих параметров возможно провести статистическими методами.

Статистические методы оценки надежности требуют большого объема экспериментальных данных. Кроме того, они не позволяют непосредственно связать показатели надежности с механическими и физическими характеристиками изделия и с воздействующими факторами. Отказы рассматривают как некоторые отвлеченные случайные события, а многообразные физические состояния изделий и их элементов сводят в основном к двум состояниям – исправности и неисправности, которые описываются функциями надежности.

В основе любого инженерного расчета лежит физический закон, описывающий данные явления. Исследование долговечности и сохраняемости и их повышение возможны только с помощью детального изучения процессов, приводящих к отказам, то есть недостаточно рассмотрение элементов в виде «черного ящика», обладающего определенными статистическими закономерностями.

Расчеты машин на надежность сложны потому, что в основе инженерной задачи по определению параметров машины с учетом износа, коррозии, усталости и др. лежат сложные физические процессы, приводящие к потере работоспособности машины с те-

чением времени. Необходимо создание методов расчета элементов конструкций на долговечность на базе временных зависимостей, описывающих процессы разрушения материалов, в которых фигурируют не опытные коэффициенты, а физические константы [6].

Оценка надежности на стадии проектирования обычными расчетными методами невозможна из-за отсутствия необходимых для этого исходных данных. В настоящее время предпринимаются попытки построения статистической теории деформирования и разрушения твердых тел. Например, были предложены простейшие статистические модели, описывающие пластическую деформацию в условиях одноосного напряженного состояния и позволяющие подойти к созданию статистической теории растяжения; вероятностные методы были использованы для вычисления пределов текучести поликристаллических тел при сложном нагружении [2], построения теории хрупкого разрушения.

В научной и технической литературе отсутствуют какие-либо рекомендации по выбору критериев предельного состояния материалов при низких температурах [5].

Известно, что температура может оказывать существенное влияние на свойства материала, его прочность, пластичность. При охлаждении многих конструкционных материалов происходят рост напряжений второго рода и образование микротрещин, деформирование сопровождается эффектом Баушингера в микрообъемах металла, наряду со скольжением часто существенную роль начинают играть изгибание, двойникование и сброс, изменяется кинетика разрушения. В результате по своим механическим свойствам и структурному состоянию материал как бы переходит из одной категории в другую (например, становится более неоднородным по структуре, более хрупким) [5].

Учитывая, что с изменением температуры металл проявляет различную способность пластически деформироваться, в основу анализа при построении теории прочности можно положить представление Прандтля о двух типах разрушения: хрупком (отрывом – от нормальных напряжений) и вязком (сдвигом – от касательных напряжений). Схема Прандтля, как известно, получила широкое развитие в трудах механиков советской школы [5].

Статистический подход позволяет оценить надежность изделия с любой заданной точностью, но при этом увеличиваются объем и длительность испытаний, и тем более, чем надежнее изделие. Поэтому использование статистических методов в ряде случаев становится недостаточно эффективным при оценке надежности высоконадежных изделий. Кроме того, эти методы не позволяют непосредственно связать показатели надежности с физическими характеристиками элементов и воздействующими на них факторами.

Физические закономерности процесса длительного и усталостного разрушения принципиально отличны (например, при высокой температуре длительное разрушение идет по границам зерен материала, тогда как усталостное разрушение пересекает зерна). Однако количественные описания закономерностей длительной и усталостной прочности во многих отношениях близки, если вместо числа циклов подразумевать длительность нагружения (степенной закон долговечности, линейное суммирование повреждений, логарифмически нормальный закон долговечности) [10].

Только методы оценки надежности, основанные на физическом подходе, позволяют определять надежность узлов и конструкций на стадии проектирования и производить их ускоренную оценку.

Физические методы оценки надежности элементов позволяют устранить эти недостатки, однако оценка параметров физической модели надежности только на основании физико-теоретических соображений невозможна, так как некоторые параметры физических моделей в настоящее время известны приближенно, а сами модели неточны. Оценку этих параметров возможно провести статистическими методами.

В последнее время предпринимаются попытки совместного использования информации о физических процессах разрушения и статистических данных и разработке физико-статистического метода оценки надежности. Физико-статистические методы оценки надежности позволяют использовать совместно результаты исследований физических процессов отказа и данные эксплуатации и статистических испытаний на надежность конструкции.

Под физической моделью какого-либо процесса при внешнем воздействии следует понимать по возможности полное (в соот-

ветствии с достигнутым уровнем знаний) описание этого процесса в физически содержательных терминах. В физическую модель должны входить без всяких упрощений известные функциональные, дифференциальные и прочие соотношения и связи между параметрами процесса.

Физические модели реальных систем оказываются обычно весьма сложными и не вполне определенными, что сильно осложняет (или делает невозможным) их анализ. Все это приводит к необходимости создания расчетных моделей (рис. 14).

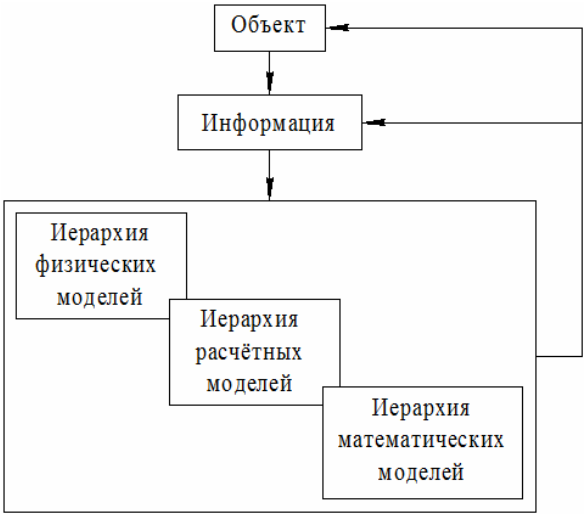


Рис. 14. Структурная схема построения моделей [12]

Расчетная модель также описывает процесс в физически содержательных терминах, но в отличие от физической модели в ней должны быть отброшены параметры и факторы, которые в заданных условиях и границах не оказывают заметного влияния на ход процесса, сложные математические зависимости или соотношения должны быть заменены по возможности более простыми, приближенными или аппроксимирующими соотношениями (табл. 1, 2).

Скорость протекания физико-химических и механических процессов (ФХМП) во времени или в конечном счете скорость потери

работоспособности для каждого действующего параметра $B_i(t)$ определяется как [11]

$$B_i^1 = \pm k(T) f_i\left[B_1(t), B_2(t), ..., B_\ell(t)\right]. \qquad (6.2)$$

Знак «плюс» в (6.2) означает возрастание запаса работоспособности изделия, а знак «минус» – снижение.

Из табл. 1 [11] видно, что аналитические выражения скоростей определяются величинами взаимодействующих параметров (6.2) и обобщенной энергии ФХМП, которая входит в уравнение константы скорости (6.1).

Разрушение является безактивационным процессом лишь при очень низких температурах (близких к абсолютному нулю) или при действии напряжений, равных пределу теоретической прочности (прочности атомных связей).

Скорость многих физико-химических процессов, протекающих в материалах, можно описать выражениями экспоненциального вида (табл. 1, 2).

В качестве моментных функций $\xi_\gamma(t)$ функционального параметра $Y(t)$ целесообразно использовать аппроксимации [2] (табл. 2)

$$\xi_\gamma(t) = a + bt;$$

$$\xi_\gamma(t) = at^b;$$

$$\xi_\gamma(t) = at^b + c;$$

$$\xi_\gamma(t) = ae^{bt};$$

$$\xi_\gamma(t) = ae^{bt} + c.$$

Необходимо отметить, что выражение

$$\tau = A \exp(-\alpha\sigma) \qquad (6.3)$$

теряет физический смысл при $\sigma \to 0$. Здесь τ – длительная прочность (долговечность); σ – напряжение; A и α – параметры, определяемые свойствами материала и температурой.

Общеприняты классические представления о пластической деформации и разрушении материалов, наступающих тогда, когда действующие в материале напряжения достигают некоторой критической величины. Поэтому при напряжениях, меньших предела упругости, пластическая деформация вообще не может развивать-

ся, а разрушение тела происходит (практически мгновенно) только тогда, когда напряжение достигает предела прочности. Однако в процессе эксплуатации технических устройств имели место разрушения целых конструкций при незначительной величине напряжений в них. В связи с этим разрушение материала рассматривают не как критическое состояние, а как постепенный кинетический процесс, развивающийся в механически напряженном материале с момента приложения к нему нагрузок, и временные закономерности потери изделием работоспособности могут быть получены на основе анализа термоактивационных процессов.

Таблица 1

Классы физико-химико-механических процессов [11]

Механизм ФХМП, константа скорости	Порядок ФХМП	Скорость ФХМП	Уравнение ФХМП
1. Однопараметрический			
1.1. $B_1 \xrightarrow{k} B_2$	0 1	$B_1^1 = -k$ $B_1^1 = -kB_1$	$B_1 = B_{10} - kt$ $B_1 = B_{10}e^{-kt}$
1.2. $B_1 \xrightarrow{kt} B_2$	0 1	$B_1^1 = -kt$ $B_1^1 = -ktB_1$	$B_1 = B_{10} - \frac{k}{2}t^2$ $B_1 = \ell nB_{10}e^{-kt^2}$
1.3. $B_1 \xrightarrow{kt^{z-1}} B_2$	0 1	$B_1^1 = -kt^{z-1}$ $B_1^1 = -kt^{z-1}B_1$	$B_1 = B_{10} - kt^z/z$ $B_1 = \ell nB_{10}e^{-kt^z/z}$
1.4. $B_1 \xrightarrow{k/t} B_2$	0 1	$B_1^1 = -k/t$ $B_1^1 = -kB_1/t$	$B_1 = B_{10} - k\ell nt$ $B_1 = \ell nB_{10}e^{-k\ell nt}$
1.5. $B_1 \xrightarrow{k/(t_0+t)} B_2$	0 1	$B_1^1 = -k/(t_0+t)$ $B_1^1 = -kB_1/(t_0+t)$	$B_1 = B_{10} - k\ell n(t_0+t)$ $B_1 = \ell nB_{10}e^{-k\ell n(t_0+t)}$
1.6. $B_1 \xrightarrow{k/t^z} B_2$	0 1	$B_1^1 = -k/t^z$ $B_1^1 = -kB_1/t^z$	$B_1 = B_{10} - \frac{k}{(1-z)t^{z-1}}$ $B_1 = B_{10}e^{-\frac{k}{(1-z)t^{z-1}}}$
2. Двухпараметрический			
$B_1 + B_2 \xrightarrow{k} B_3$	0 1	$B_1^1 = B_2^1 = -k$ $B_1^1 = -kB_1B_2$	$B_1 = B_{10} - kt$ $B_2 = B_{20} - kt$
3. Трехпараметрический			
$B_1 + B_2 + B_3 \xrightarrow{k} B_4$	0 1	$B_1^1 = -k$ $B_2^1 = -k$ $B_3^1 = -k$ $B_1^1 = -kB_1B_2B_3$	

Таблица 2 [5]

Физико-химический процесс	Модель процесса
Диффузия	$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T}\right)$
Химические реакции	$c = c_0 e^{-k_p t}; k_p = k_{p_0} \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T}\right)$
Рекристаллизация твердого тела	$\frac{dx}{dt} = k^{\bullet}(1-x)\exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T}\right)$
Рост трещин в твердых телах	$\frac{dl}{dN} = A \Delta k^{n_1 q}$ $b(t) = \exp\left[\ln b_{KP} - \frac{t}{a}\left(\frac{\sigma_{CP}}{\sigma_{O,2}}\right)^2\right]$
Деформация твердого тела под напряжением	$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{\Delta G}{R_1 T}\right)$
Ползучесть	$\frac{d\varepsilon}{dt} = a \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T}\right)$
Скорость коррозии	$\frac{dy}{dt} = c_0 k_P \exp(a_1 T)$ $\frac{dy}{dt} = \gamma c_0 \exp(a_1 T t^{(\gamma-1)})$

В табл. 2 приняты следующие обозначения: t – время; T – абсолютная температура; D_0 – коэффициент диффузии при $T = 0^{\circ}$C; E_a – энергия активации; R_1 – универсальная газовая постоянная; c – концентрация вещества; k_P – константа скорости химической реакции; γ – коэффициент поверхностного натяжения; $2l$ – длина трещины; N – число циклов нагружения; b_{KP} – критическая глубина трещины; σ_{CP} – среднее напряжение; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; ε – деформация.

В настоящее время при разработке моделей разрушения часто используются феноменологические теории и в этом направлении получен ряд серьезных результатов. В то же время есть определенная тенденция получить кинетическое уравнение долговечности на основе физико-химической механики разрушения, позволяющей математически описать элементарные акты разрушения. В принципе, можно поставить вопрос о выводе кинетического уравнения процесса разрушения на основе теоретических представлений физики твердого тела об элементарных актах разрушения. Однако

многообразие возможных микромеханизмов разрушения, а также их недостаточная изученность затрудняют создание единой физической теории разрушения твердых тел. И все же, несмотря на это, представляется, что уже сейчас можно на основе выделения общих физических закономерностей, присущих всем конкретным микромеханизмам, получить кинетическое уравнение процесса разрушения твердых тел под воздействием различных нагрузок [9].

Согласно кинетической теории одним из фундаментальных свойств является зависимость прочности от времени, деформация и разрушение должны характеризоваться не предельными напряжениями, а скоростью деформации и разрушения и долговечностью – временем, требующимся для разрушения. Пределы упругости, текучести, прочности являются лишь некоторыми условными характеристиками.

Экспериментально определено, что скорость процессов механического разрушения нагруженного твердого тела и, соответственно, время до разрушения τ зависят от структуры и свойств тела, от напряжения σ, вызываемого нагрузкой, и температуры T:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) = \tau_0 \exp\left\{\frac{U_0 - \gamma_1 \sigma_f}{RT}\right\},$$

где $\tau_0 = (10^{-12}...10^{-14})c$; U_0 – энергия разрыва связей между атомами; γ –коэффициент, имеющий размерность объема; k – постоянная Больцмана; E_a –энергия активации процесса разрушения; U_0 – начальная энергия активации процесса разрушения при $\sigma = 0$, близкая к энергии сублимации материала (энергия разрыва связей между атомами; $\tau_0 = 10^{-12}c = \text{const}$ – период тепловых колебаний атомов в твердом теле; τ – долговечность или время разрушения; R – универсальная газовая постоянная; γ_1 – показатель концентрации напряжений в нагруженном теле; σ_f – величина разрывного напряжения.

Величина разрывного напряжения σ_f при фиксированном τ

$$\sigma_f = \frac{1}{\gamma}\left(U_0 - kT \ln \frac{\tau}{\tau_0}\right). \qquad (6.4)$$

Однако время до разрушения при постоянной нагрузке образцов, изготовленных из одного материала, есть случайная величина

(зависящая от случайных размеров и распределения элементарных дефектов в материале), распределяющаяся по некоторому вероятностному закону. И при циклических, и при статических нагрузках процесс разрушения идет путем последовательного накопления разрушенных связей (повреждений) до определенной величины. Эта общность процесса накопления повреждений позволяет в математической форме записать единое кинетическое уравнение для любых видов нагружения. В зависимости от вида нагружения и структуры материала должны изменяться только значения коэффициентов, входящих в это уравнение. Ввиду случайного характера изменения внутренней энергии атомов, а также случайного характера дефектов, число атомов, преодолевших межатомные связи в заданный момент времени, будет случайным. Вследствие этого и процесс разрушения будет случайным. Таким образом, объективное уравнение процесса разрушения можно получить, используя вероятностно-статистические методы. Уменьшению прочности нагруженной детали способствуют процессы, вызываемые агрессивным действием среды, давлением поверхностно-активных веществ и т. д.

При отсутствии поверхностно-активной среды временная зависимость до разрушения определяется выражением

$$\tau = A_0 \exp(-\alpha\sigma),$$

где A_0 и α – постоянные коэффициенты.

Кинетический метод оценки сопротивления композиционных материалов действию напряжений, температуры и агрессивных сред был развит в работах С.Н. Журкова, Г.М. Бартенева, В.Р. Регеля и др. Согласно кинетической теории, разрушение рассматривается как постепенный термоактивационный процесс накопления повреждений, развивающийся во времени под действием механических напряжений, тепла, химически и физически активных сред. Процесс разрыва межатомных связей является ведущим на всех стадиях разрушения.

Для описания физико-химических процессов старения применяют уравнение Аррениуса или Аррениуса – Эйринга. Эти уравнения справедливы, если действует лишь один механизм отказа. Однако необходимо учитывать несколько взаимосвязанных и параллельно протекающих процессов. Например, для описания ползучести ме-

таллов и сплавов иногда используют модели, которые наряду с основной мерой повреждений – относительной деформацией ползучести, содержат характеристики степени микрорастрескивания, плотности линий скольжения и т. п. Для описания процессов повреждения и разрушения при наличии физико-химических воздействий среды (например, при коррозии или водородном охрупчивании) необходимо добавлять уравнения диффузии и химической кинетики, содержащие дополнительные функции (см. табл. 2) [13].

Для многих элементов электроники (интегральные схемы) характерны несколько механизмов отказа с разными энергиями активации процессов старения E_a. В этом случае применяют модифицированное уравнение Аррениуса – Эйринга:

$$\frac{dR_{\Pi}(T,s)}{dt} = A\left(\frac{kT}{h}\right)\exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)\exp\left[f(s)n(T)\right],$$

где R_{Π} – изменяемый исследуемый параметр; T – температура; k – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; $f(s)$, $n(T)$ – функции параметра нетермической и термической нагрузки соответственно; A – эмпирическая постоянная.

Физические методы оценки надежности, появившиеся в последнее время, не всегда позволяют получить достоверную модель надежности элемента из-за сложности физических процессов отказов.

Процессы, определяющие кинетику разрушения, следует классифицировать по скорости их протекания на быстро протекающие, процессы средней скорости и медленно протекающие процессы [4].

Быстро протекающие процессы периодически изменяются в пределах долей секунды (вибрации узлов, изменения сил трения в подвижных соединениях, колебания рабочих нагрузок и др.). Эти процессы определяются сложными физическими взаимодействиями при эксплуатации изделия.

Процессы средней скорости проявляются в течение непрерывной работы машины, их продолжительность составляет обычно минуты или часы, они приводят к постепенному изменению начальных параметров изделий (обратимые процессы – изменения температуры самого изделия и окружающей среды, изменения влажности среды, необратимые – например, изнашивание).

Медленные процессы, протекающие на протяжении дней и месяцев эксплуатации между периодическими осмотрами или ремонтами изделия (износ основных механизмов машины, перераспределение внутренних напряжений, ползучесть металлов, коррозия, сезонные изменения температуры).

При описании и прогнозировании деградации приходится иметь дело со случайными процессами, имеющими вполне определенную тенденцию развития во времени. Такие процессы называются нестационарными.

Со временем наблюдается процесс ухудшения физико-химических характеристик материалов под действием агрессивных сред, температуры, напряжений. Функции, выражающие изменение во времени относительных значений механических характеристик конструкционных элементов, учитывающие химические и диффузионные параметры среды, характер распределения свойств материала, называют деградационными [1].

Деградационные функции определяются отношением количественных показателей свойства $B(t)$ в моменты времени t и t_0 и показывают временное изменение свойства элемента при заданных напряжениях σ, температурах T и концентрациях среды c. Общий вид деградационной функции можно представить выражением [8]

$$D(B) = [B(t, T, \sigma, c, \mu)]/[B(t_0, T)],$$

где $B(t_0, T)$ – количественное значение характеристики, определенное кратковременными испытаниями при температуре T; $B(t, T, \sigma, c, \mu)$ – количественное значение характеристики, определенное после экспозиции в течение времени t при температуре T в среде с концентрацией c и химической активностью μ при действующих напряжениях σ.

Практический интерес представляют деградационные функции несущей способности для центрально нагруженных $D(N)$ или изгибаемых $D(M)$ элементов, жесткости $D(W)$. Между различными деградационными функциями существует определенная связь [8]

$$D(N) = f\{D(W)\},\ D(M) = f\{D(N)\},\ D(M) = f\{D(W)\}. \qquad (6.5)$$

Это дает возможность осуществлять расчеты лишь с одной деградационной функцией, определение которой более удобно.

Изменение во времени несущей способности нельзя определить без учета изменения размеров поперечного сечения элемента и прочности материала. То же самое относится и к применению жесткости с той лишь разницей, что изменение жесткости элемента можно определить с помощью неразрушающих методов (релаксационные, динамические испытания). Поэтому базовой функцией, определяемой экспериментально в первую очередь, следует считать деградационную функцию жесткости.

Для материала, определяемого как совокупность структурных элементов, под действием нагрузки, температуры, агрессивных сред ухудшаются свойства, снижается надежность и возможен даже отказ этих элементов и, следовательно, всей структурной системы. Поэтому деградация системы обусловлена последовательным отказом наиболее слабых структурных элементов, накоплением дефектов в структуре.

Деградация структурной системы определяется процессом накопления отказавших элементов. Предположим, что в элементарном объеме V композита содержится n структурных элементов с единичным объемом, т. е. выполняется условие $n = V$. При единичной высоте объема $n = F$, где F – площадь поперечного сечения.

Если система состоит из n элементов, каждый из которых может находиться всего в двух состояниях – состояние отказа и состояние функционирования, то система может находиться в $N = 2^n$ различных состояниях, определяемых множеством состояний G всех ее элементов.

В момент времени t система может находиться в любом из $m + 1$ состояний E_0, E_1, E_2, ..., E_m, различающихся между собой количеством отказавших структурных элементов, которое возрастает по мере увеличения номера состояния. Множество состояний $s_r = m + 1$ является состояниями работоспособности системы ($s_r \in G$). Переход из состояния E_i в состояние E_{i+1} означает отказ в системе структурных элементов. Следовательно, система работоспособна до тех пор, пока число отказавших элементов не превышает m шагов. Граф переходов из одного состояния в другое показан на рис. 15, где E_m – состояние отказа системы; λ_m – интенсивность внезапных отказов системы; λ_{ij} – интенсивность отказов структурных элементов при переходе от состояния E_i к состоянию E_j, определяемая по формуле [8]

$$\lambda_{ij}(t) = \lim \frac{P_{ij}(t, t+\Delta t)}{\Delta t} + 0(\Delta t),$$

где $P_{ij}(t, t + \Delta t)$ – вероятность того, что система в момент времени $t + \Delta t$ окажется в состоянии E_j при условии, что в момент t система находилась в состоянии E_i (вероятности перехода); $0(\Delta t)$ – условное обозначение бесконечно малой величины более высокого порядка малости, чем λ_{ij}, для которой выполняется условие [8]

$$\lim \frac{0(\Delta t)}{\Delta t} = 0.$$

Граф переходов имеет особенность, которая заключается в особой роли состояния E_m. Попав в состояние E_m, система останется в нем на все дальнейшее время. Состояния, обладающие такими свойствами, называются поглощающими. Поглощающее состояние есть состояние отказа системы, завершающее процесс деградации. Так как в процессе деградации отказавшие структурные элементы не восстанавливаются, то переходы в системе возможны только из предыдущего состояния в последующее, т. е. согласно графу переходов (рис. 15).

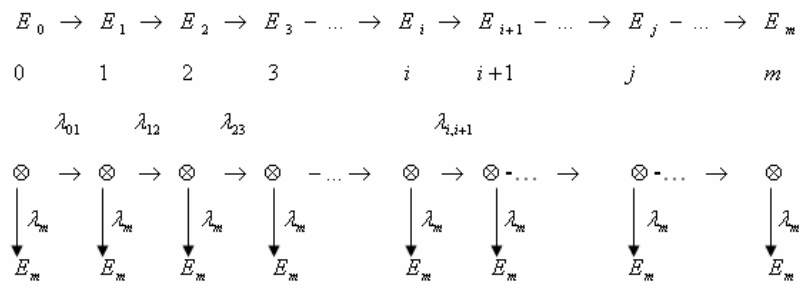


Рис. 15. Граф переходов для случайного процесса равномерной деградации [8]

Переходные вероятности зависят от числа циклов и параметров, характеризующих нагружение [10]:

$$P_{ij} = P_{ij}(\mathrm{n}; \sigma_v, \sigma_m, f, T),$$

где σ_v, σ_m, f, T – амплитуда переменных напряжений, среднее напряжение, частота переменных напряжений, температура окружающей среды.

Вероятности перехода P_{ij} задают матрицу вероятностей перехода за один шаг. Под шагом понимается действие, способное перевести систему из одного состояния в другое. При этом нас не интересует, какое время затрачивается на один шаг деградации.

Если число состояний структурной системы равно $m + 1$, то матрица вероятностей перехода имеет вид [8]

$$\{P_{ij}\} = \begin{vmatrix} P_{00}P_{01}...P_{0j}...P_{0m} \\ P_{10}P_{11}...P_{1j}...P_{1m} \\ ... \\ P_{i0}P_{i1}...P_{ij}...P_{im} \\ ... \\ P_{m0}P_{m1}...P_{mj}...P_{mm} \end{vmatrix}.$$

Для матрицы $\{P_{ij}\}$ справедливо свойство: сумма вероятностей перехода, находящихся в одной строке, равна единице, т. е.

$$\sum_{j=0}^{m} P_{ij} = 1.$$

Поскольку деградационные отказы структурных элементов необратимы, то вероятности перехода $P_{ij}(t) = 0$ при $j < i$. Следовательно, процесс деградации структурной системы характеризуется матрицей переходных вероятностей, имеющей треугольный вид. При этом вероятность $P_{nm} = 1$, так как состояние E_m является поглощающим.

Процесс случайных изменений состояний некоторой системы, заданный матрицей вероятностей перехода, называется стохастическим. Так как переход структурной системы из одного состояния в другое возможен в любой момент времени t, а вероятности $P_{ij}(t, t + \Delta t)$ перехода системы из состояния E_i в момент времени t в состояние E_j в момент времени $t + \Delta t$ не зависят от поведения системы до момента времени t, то стохастический процесс является марковским.

Марковские процессы являются наиболее изученным классом случайных процессов. Особое положение, занимаемое марковскими процессами среди других случайных процессов, объясняется тем, что, во-первых, с их помощью можно адекватным образом описывать поведение многих реальных физических систем и, во-вторых, для них хорошо разработан математический аппарат, позволяющий решать многие прикладные задачи надежности. Тре-

бование экспоненциальности законов, как правило, не является существенным ограничением по двум причинам. Во-первых, если рассматриваемый интервал нормальной эксплуатации системы не слишком велик, так что на нем можно пренебречь старением составляющих элементов, то упомянутое требование выполняется. Во-вторых, в условиях явного старения какой-то части элементов системы использование допущения об экспоненциальном законе распределения их наработок на отказ ведет к оценке надежности технической системы с запасом.

Если в момент t структурная система находилась в состоянии E_i и вероятности перехода в состояние E_j зависят от длины промежутка времени Δt и не зависят от момента времени t, то процесс является однородным во времени и должно соблюдаться условие [8]

$$P_{ij}(t, t + \Delta t) = P_{ij}(\Delta t).$$

Отождествляя число структурных элементов с площадью поперечного сечения конструкционного элемента, можно записать, что $n - j = F_j$. Тогда вероятность P_{ij} будет означать, что в момент времени t площадь поперечного сечения конструкционного элемента равна F_j.

При начальном условии $F_j(0) = F_0$ получаем [8]

$$\overline{F}_j(t) = F_0 e^{-\int_0^t (\lambda_j + \lambda_m) dt} = F_0 e^{-\int_0^t \lambda_{jm} dt}. \qquad (6.6)$$

Уравнение (6.6) дает возможность определить среднее значение рабочей площади поперечного сечения конструкционного элемента в момент времени t после начала эксплуатации. Но для этого необходимо знать зависимость интенсивности отказов λ_{jm} от времени t энергетического состояния структурной системы, определяемое количеством энергии $U(t)$, воздействующей на систему. Если интенсивность отказов находится в прямой зависимости от количества энергии, приложенной к системе, и в степенной зависимости от продолжительности t энергетических воздействий, то для стареющих элементов интенсивность отказов можно принять в виде функции [8]

$$\lambda_{jm} = \lambda_0 U(t) a t^{a-1}, \qquad (6.7)$$

где λ_0 – коэффициент пропорциональности; a – параметр, определяемый экспериментально, для стареющих элементов $a > 1$, для элементов со скрытыми дефектами $a < 1$.

Тогда с учетом выражения (6.7) формула (6.6) примет вид [8]

$$\overline{F}_j(t) = F_0 e^{-\lambda_0 \int_0^t U(t) a t^{-a-1} dt}. \qquad (6.8)$$

Если энергетическое состояние системы во времени не меняется, т. е. $U(t) = \text{const}$, то после интегрирования получим [8]

$$\overline{F}_j(t) = \overline{F}_0 e^{-\lambda_0 U t^a}. \qquad (6.9)$$

Так как элементы структурной системы имеют скрытые дефекты и являются стареющими, то в уравнениях (6.8) и (6.9) можно принять $a = 1$, тогда получаем экспоненциальный закон деградации структурной системы [8]

$$\overline{F}_j(t) = \overline{F}_0 e^{-\lambda_0 U t}. \qquad (6.10)$$

Если предположить, что среднее число целых волокон $\overline{F_0}$ в начальный момент времени зависит от энергии активации U_0 и температуры среды, то для определения $\overline{F_0}$ запишем [8]

$$\overline{F_0} = \overline{F_{01}} \exp\{U_0 / kT\}.$$

Количество энергии $U(t)$, воздействующей на систему, определим как сумму механической $\gamma^1\sigma$ и химической $c\beta$ энергии, взятых относительно тепловой энергии kT; подставив эти значения в формулу (6.8) и принимая $\int_0^t \sigma dt = \overline{\sigma}(t)$, а $\int_0^t c dt = \overline{c}(t)$, получим [8]

$$F_j(t) = F_0 \exp \frac{-\lambda_0 \gamma^1 \overline{\sigma}(t) - \lambda_0 \beta \overline{c}(t)}{kT}, \qquad (6.11)$$

где $\overline{\sigma}(t)$ – действующее напряжение; γ^1 – структурный коэффициент; β – химический потенциал; $c(t)$ – концентрация агрессивной среды; k – постоянная Больцмана; T – температура.

В ряде работ для описания процесса разрушения вводится характеристика состояния поврежденности материала, которая в различных работах называется по-разному: трещиноватостью, повреждаемостью, сплошностью. Эта характеристика описывает рассеянный характер разрушения материала. Относительное число отказавших структурных элементов $П_j$, являющееся мерой поврежденности структурной системы или поперечного сечения (объема) элемента

$$П_j = \frac{\overline{F}(0) - \overline{F_j}(t)}{F_0} = 1 - \exp\left\{\frac{-\lambda_0 \gamma^1 \overline{\sigma}(t) - \lambda_0 \beta \overline{c}(t)}{k_1 T}\right\}. \qquad (6.12)$$

Функция $\Pi_j = 0$ при $\overline{F_j}(t) = \overline{F}(0)$ и $\overline{\Pi_j} = 1$ при $\overline{F_j}(t) = 0$.

В соответствии с представлениями теории хрупкого разрушения тело представляется как соединение большого числа N элементов (слабых мест), прочности которых являются случайными величинами с одинаковыми распределениями. Предположим, что элементы независимы (нет перераспределения напряжений в процессе деформации). Обозначим через S – напряжение, а через S^* – несущую способность так, что $S = S^*/W$, где W – площадь сечения.

Предполагается, что прочность тела S задается равенством

$$S = \min \{S_1, S_2, ..., S_N\}, \tag{6.13}$$

где S_i – прочности элементов.

Введем обобщение понятия хрупкого разрушения следующим образом. Упорядочим прочности S_i элементов в порядке их возрастания, тогда значения прочности элементов

$$S_1 \le S_2 \le ... \le S_j \le ... S_N. \tag{6.14}$$

Таким образом, при хрупком разрушении прочность тела задается как $S = S_1$. Примем, что прочность тела задается как $S = S_v$, где $v \ge 1$. При $v = 1$ имеем ситуацию хрупкого разрушения, при $v > 1$ реализуется полухрупкое разрушение. В физическом смысле полухрупкое разрушение означает, что для полного разрушения тела необходимо, чтобы разрушились v его слабейших элементов.

Экспериментальные данные по вязкому разрушению носят довольно противоречивый характер [4]. По всей видимости, это связано с трудностью обеспечения условий подобия разрушения при изменении размеров напряженного объема. Кроме того, часто технология изготовления и вариации химического состава оказывают на изменения $M\{S\}$ и $V\{S\}$ большее влияние, чем изменения размеров напряженного объема. Однако в целом можно принять [4], что при вязком разрушении $M\{S\}$ остается примерно постоянным в широком диапазоне изменения размеров напряженного объема, а величина $V\{S\}$ несколько уменьшается с увеличением размеров.

Обычно при задании норм прочности не оговариваются материал и технологические методы обеспечения прочности. Поэтому важно иметь в виду, что более надежными окажутся конструкции, у которых коэффициент вариации $V\{S\}$ прочности меньше. В час-

тности, более надежными окажутся конструкции, отвечающие условиям вязкого разрушения, когда v возрастает вместе с W и при этом коэффициент $V\{S\}$ уменьшается с увеличением W. В этом плане нормы прочности нуждаются в важном дополнении. Необходимо указывать в нормах наибольший допустимый коэффициент вариации $V\{S\}$ прочности S для используемых материалов. К сожалению, часто в погоне за экономией массы и материала конструкторы стремятся использовать материалы в среднем более прочные без учета коэффициента вариации их прочности. Это приводит к неожиданным разрушениям.

Коэффициент запаса прочности следует выбирать из условий хрупкого разрушения. Если в действительности имеют место условия полухрупкого или вязкого разрушения, то надежность только повысится.

Поскольку применительно к данным нормам прочности используются различные конструктивные материалы и их соединения, то необходимо по экспериментальным данным об их прочности S вычислить коэффициенты $V\{S\}$ вариации прочности. Найдя применительно ко всему спектру материалов наибольшее значение $V\{S\}$, примем его за нормативное и введем в нормы прочности ограничение на используемые материалы в виде нормы B. Используемые материалы должны отвечать неравенству $V\{S\} \le B$.

В настоящее время при использовании феноменологических теорий разрушения получен ряд серьезных результатов. В то же время существует тенденция получения кинетических уравнений долговечности на основе физико-химической механики разрушения, позволяющей математически описать элементарные акты разрушения. Однако многообразие возможных микромеханизмов разрушения, а также их недостаточная изученность затрудняют создание единой физической теории разрушения твердых тел. И все же представляется, что на основе выделения общих физических закономерностей, присущих всем конкретным микромеханизмам, можно получить кинетическое уравнение процесса разрушения твердых тел под воздействием различных нагрузок [9].

7. СИСТЕМА. СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

Одним из направлений методологии научного познания является системный подход, основанный на изучении объектов как систем. Изучение физических процессов, изменяющих показатели качества изделий и их элементов (понятие «качество» имеет весьма широкий смысл; например, для несущих конструкций, основное назначение которых – воспринимать большие нагрузки без разрушения, значительных деформаций и повреждений, качество зависит от соотношения между уровнем нагрузок и сопротивлением элемента этим нагрузкам), наиболее полно можно провести лишь в рамках системного подхода при анализе системы «изделие – среда».

Техническая система состоит из множества элементов, взаимосвязанных функционально и взаимодействующих друг с другом в процессе выполнения определенного круга задач.

Индивидуальность системы проявляется в ее структуре (относительно постоянной во времени морфологии) и поведении (функционировании во времени), которые взаимно обусловлены.

Необходимость применения системного подхода вытекает из рассмотрения системных принципов, к которым относятся целостность, структурность, взаимозависимость системы и среды, иерархичность структуры, множественность описания каждой системы, стохастичность поведения, изменчивость во времени и др.

Целостность – принципиальная несводимость свойств системы к сумме свойств составляющих ее элементов и невыводимость свойств системы из свойств составляющих ее элементов, так как свойства объекта как целостной системы определяются не столько суммированием свойств его отдельных элементов, сколько свойствами его структуры; процессы разрушения системы в целом уже не могут быть описаны в виде аддитивной функции процессов старения отдельных элементов.

Взаимозависимость системы и среды означает, что система формирует и проявляет свои свойства в процессе взаимодействия со средой (свойство открытости), являясь при этом ведущим компонентом взаимодействия.

Множественность описания каждой системы состоит в том, что вследствие сложности системы ее адекватное познание требу-

ет построения множества различных моделей, каждая из которых описывает лишь определенный аспект системы. Например, при изучении надежности рассматривается модель эксплуатации невосстанавливаемых изделий для определения вероятностных характеристик ресурса и срока службы изделий, а также наработки до первого отказа.

В соответствии с системным принципом иерархичности каждый элемент может рассматриваться как система, а исследуемая в данном случае система представляет собой один из элементов более сложной системы, т. е. понятия «система» и «элемент» относительны и трансформируются в зависимости от поставленной задачи.

Система A при фиксации ее цели определяется своей структурой $|A|$ и поведением $\overline{A}$

$$A = (|A|, \overline{A}).$$

Целью системы является достижение определенного предпочтительного состояния.

Чисто аналитически систему можно представить как вектор состояния $\overline{S}$, и правило для его определения в любой момент времени t

$$\overline{S} = \begin{Vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{Vmatrix},$$

где x_i – компоненты вектора состояния, определяющие различные свойства системы.

Состояние системы не определяется только физическими свойствами подлежащей изучению реальной системы, все зависит от того, что необходимо узнать о физических процессах в системе, что можно наблюдать и измерить, и от точности этих измерений. Поэтому для определения компонент вектора состояния системы не так уж необходимо углубляться во внутреннюю характеристику системы.

Все множество состояний системы принято называть фазовым пространством состояния системы. Введя чисто математическое понятие «система», можно в фазовом пространстве состояний определить понятие «процесс». Пусть $\overline{S_0}$ – состояние системы в на-

чальный момент, $\overline{S}_1$ – состояние системы через время τ, $\overline{\Omega}_2$ – через время 2τ и вообще $\overline{\Omega}$ – состояние системы через время $n\tau$. Тогда последовательность векторов $(\overline{S}_0, \overline{S}_1, \overline{S}_2, ..., \overline{S}_n)$ изображает временную историю системы, наблюдаемую в некоторые дискретные моменты времени. Эта последовательность векторов и называется процессом. Любой изучаемый процесс характеризуется помимо вектора состояния некоторым оператором, т. е. правилом, в соответствии с которым осуществляется переход из одного состояния в другое. В зависимости от вида этого оператора процесс может быть стационарным, когда оператор перехода не меняется со временем, и нестационарным, когда оператор – функция времени, детерминистическим, когда воздействие оператора приводит к определенному вектору состояния, и стохастическим, когда воздействие оператора определяет вектор состояния лишь с некоторой вероятностью, и т. д. Задачей исследования процесса изменения системы является поиск этого оператора.

Динамичная система изменяет свое состояние во времени и в разное время может находиться в различных состояниях. Переход системы из одного состояния в другое с течением времени вызывается различными факторами, которые в общем случае являются случайными. Выходные параметры технической системы в условиях эксплуатации являются случайными величинами Φ_X, наиболее полной характеристикой которых является закон распределения $F(z) = P\{\Phi_X \le z\}$.

Каждый элемент системы в любой момент времени может находиться в определенном состоянии, которое характеризуется значениями его параметров – как выходных, так и внутренних. Реально большинство параметров элементов может принимать непрерывное (континуальное) множество состояний. Если таких параметров, определяющих состояние элемента, несколько, то состояния элементов будут представляться точками многомерного континуального пространства.

На практике очень часто удается использовать грубую модель элемента системы, когда можно говорить только о двух состояниях элемента – состоянии работоспособности и состоянии отказа. С течением времени происходит случайное изменение значений пара-

метров элемента. В простейшем случае поведение элемента с двумя состояниями может быть описано случайной функцией вида

$$x(t) = \begin{cases} 1, \text{ если элемент работоспособен} \\ 0, \text{ если элемент отказал.} \end{cases}$$

Такие элементы часто называют простейшими.

Поведение отдельно рассматриваемых элементов может существенно отличаться от поведения таких же элементов, входящих в состав определенной системы, так как всякая система накладывает на отдельные элементы определенные связи: появляется взаимозависимость отказов. Это приводит к тому, что поведение некоторого k-го элемента системы может определяться предысторией части или даже всех остальных элементов системы, т. е.

$$x_k(t + dt) = f_k\{x_k(0, t), x_1(0, t), ..., x_n(0, t)\},$$

где вид функции f_k определяется конкретным характером системы.

Совокупность состояний всех n элементов системы в некоторый момент времени определяет состояние системы в этот момент времени, а совместное изменение состояний всех элементов системы определяет поведение системы во времени.

В процессе функционирования вследствие воздействия внешней среды и изменения состояния отдельных ее элементов система, по сути дела, претерпевает случайное изменение структуры. Удобно говорить, что система с течением времени переходит из одного состояния, характеризуемого совокупностью состояний отдельных элементов, в другое. Так, если i-й элемент системы может находиться в k_i состояниях $S_{i1}, S_{i2}, ..., S_{ik}$, то состоящая из n элементов система в целом характеризуется фазовым пространством с числом состояний, равным $k = \prod_{i=1}^{n} k_i$.

Состояния системы могут быть дискретными и непрерывными. Система с дискретными состояниями имеет счетное множество возможных состояний $S_1, S_2, ..., S_n$. Переход системы из одного состояния в другое осуществляется скачком в момент, когда в системе происходит событие, вызванное фактором, изменяющим состояние системы.

В системе с непрерывным временем переход из одного состояния в другое возможен в любой момент времени, а в системе с дис-

кретным временем – только в определенные моменты времени t_1, t_2, ..., разделенные конечными интервалами.

Граф состояний системы показывает ее возможные состояния и направления возможных переходов системы из одного состояния в другое. На графе множество состояний системы (вершины графа) изображаются прямоугольниками, а множество возможных переходов системы из одного состояния в другое – линиями (связи или ребра графа), соединяющими соответствующие прямоугольники.

В ориентированном графе состояний системы линии связи заменяются стрелками, указывающими направления возможных переходов системы из одного состояния в другое. Например, на рис. 16 показан граф состояний системы, имеющей четыре возможных состояния S_1, S_2, S_3, S_4. Из состояния S_1 возможны переходы в состояния S_2 или S_4, из состояния S_2 – в состояние S_3 и обратно в состояние S_1, из состояния S_3 в состояние S_4, из состояния S_4 – обратно в состояние S_3.

В размеченном графе состояний системы на связях (ребрах) указывается характеристика фактора, переводящего по данной связи систему из одного состояния в другое. Например, интенсивности (λ_{12}, λ_{13}, λ_{21}, λ_{23}) потоков событий (рис. 17).

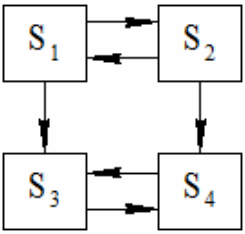


Рис. 16. Ориентированный граф состояний системы

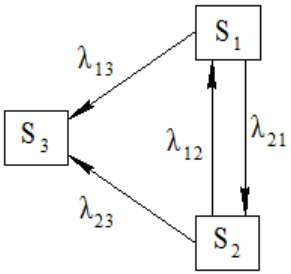


Рис. 17. Размеченный граф состояний системы

Переходы системы из одного состояния в другое могут быть обратимыми и необратимыми. Переходы системы при эксплуатации являются главным образом обратимыми: в результате отказа изделие переходит из работоспособного состояния в неработоспособное и, наоборот, из неработоспособного в работоспособное

в результате восстановления его работоспособности и т. д. Однако в системе эксплуатации происходят и необратимые переходы, например переход изделия в неработоспособное предельное состояние является необратимым.

Центральное место в аксиоматическом построении принципов формирования необходимых свойств технической системы в процессе ее создания и эксплуатации принадлежит условию равновесия системы по различным критериям ее состояний. С термодинамической точки зрения система (или ее элементы) находится в равновесии, если среднестатистические значения ее выходных параметров остаются постоянными в допустимых пределах. Реальные процессы изготовления и эксплуатации технической системы могут быть описаны схемами перехода равновесных состояний конструкции с помощью системы параметров ее качества $\sum_{i=1}^{n} \omega_i$ (рис. 18). Переход системы $S_1 \to S_2 \to S_3 \to \ldots S_i$ и $S_1^1 \to \ldots S_i^1$ происходит через промежуточные состояния, определяемые физико-химическими, химико-технологическими и другими свойствами конструкции [7].

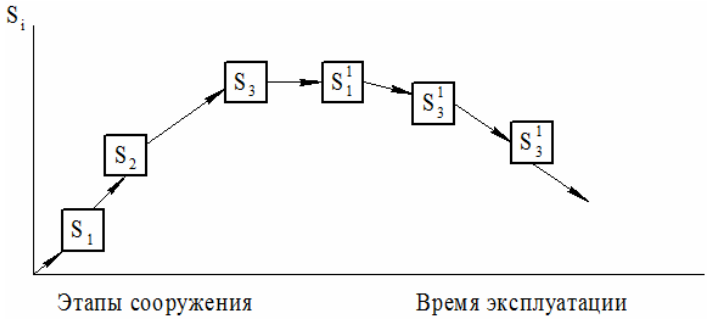


Рис. 18. Схема перехода равновесных состояний системы в процессе сооружения и эксплуатации [7]

Переходы равновесных состояний системы являются взаимообусловленными с точки зрения развития причинно-следственных связей. Согласно термодинамическому принципу смещения равновесия Ле-Шателье, если систему, находящуюся в равновесии, подвергнуть внешнему воздействию, нарушающему это равновесие, возникает новое равновесие, переход к которому осущест-

вляется процессом, стремящимся противодействовать указанному воздействию. С физико-химической точки зрения трактовка этого принципа применительно к изготовлению металлоконструкций может быть следующей. При переходе от одной технологической операции к другой обусловливается новое равновесное состояние системы $S(\sum_{i=1}^{n}\omega_i)_I \rightarrow S(\sum_{i=1}^{n}\omega_i)_П$. Направленное технологическое воздействие, являющееся внешним по отношению к системе, обусловливает ответную реакцию системы, выражающуюся плавным или скачкообразным изменением фактического уровня качества (изменением уровня напряженно-деформированного состояния, появлением или закономерным ростом дефектности и др.) [7].

Подавляющее большинство современных работ по надежности базируются на логических связях как более простых и доступных для реализации с помощью существующего математического аппарата. Построение же теории надежности на функциональной основе – дело куда более сложное. В этом случае необходимо располагать всеми зависимостями основных выходных характеристик системы Y_i от входных воздействий x_S и параметров элементов β_k^i. Тогда состояние системы можно описать набором конечного числа ее выходных параметров Y_i ($i = 1, 2, ..., n$).

Положение вектора состояний системы

$$\vec{S}_n = \{Y_1, Y_2, ..., Y_n\}, \tag{7.1}$$

где

$$Y_i = \varphi_i[x_S, \beta_k^j], \tag{7.2}$$

$$s = 1, 2, ..., d; \quad k = 1, 2, ..., m; \quad j = 1, 2, ..., \ell,$$

в n-мерном пространстве будет характеризовать в общем случае эффективность функционирования этой системы, если указанное пространство разбивается на конечное число непересекающихся подпространств. При разделении всего множества возможных состояний системы S существуют только два непересекающихся подмножества: работоспособное R и неработоспособное Q:

$$R \cap Q = \varnothing, \quad R \cup Q = S. \tag{7.3}$$

Можно оценить надежность функционирования этой системы.

Из формул (7.1) и (7.2) видно, что сложность такой модели определяется, во-первых, сложными функциональными связями φ_i и, во-вторых, большим числом параметров (s, k, j).

Статистическую модель разрушения можно представить в виде системы из $m + 1$ состояний S_0, S_1, ..., S_m, причем каждое из состояний выражает стадию разрушения (7.4). Состояние наибольшего упрочнения обозначается S_0, состояние полного разрушения – S_m [5].

$$S_0 \to S_i \to S_{j-1} \to S_j \to S_m. \tag{7.4}$$

Конкретный выбор числа промежуточных состояний (стадий разрушения или упрочнения) несущественен при построении модели разрушения и определяется удобством статистического описания исходных экспериментальных данных [5].

Интенсивности переходов зависят только от состояния системы в данный момент времени и не зависят от предшествующей истории (величина λ имеет только индексы состояния) [5]; процесс перехода является ординарным, т. е. за время dt система может сдвинуться только на одно состояние или остаться в прежнем [5]. Указанные допущения характеризуют марковский процесс (с конечным числом состояний и непрерывным временем) [5].

Время в рассматриваемом процессе имеет обобщенный смысл. Для описания длительного разрушения величина t представляет время нагружения, для анализа усталостного нагружения $t = n$, где n – число циклов нагружения [5].

Рассмотрим однородный процесс разрушения без восстановления (процесс гибели). В этом случае основное уравнение процесса примет вид [5]

$$\frac{dP_{ij}}{dt} = P_{i,j-1}(t)\lambda_{j-1}(t) - P_{ij}(t)\lambda_j(t), \quad i = 0, 1, ..., m-1;\ i \le j \le m. \tag{7.5}$$

В начальный момент времени система находится в i-м состоянии, дальнейшее движение возможно только в сторону разрушения [5].

Таким образом, в начальный момент [5]

$$P_{ii}(0) = 1;\ P_{ij}(0) = 0 (j > i). \tag{7.6}$$

В любой момент времени [5]

$$\sum_{j=0}^{m} P_{ii}(t) = 1, \tag{7.7}$$

так как система должна находиться в одном и только одном состоянии.

Наиболее важный для практики вопрос – определение статистических характеристик времени разрушения (поглощения). Обозначив время разрушения через t_m, получим функцию распределения для этой случайной величины [5]

$$F(t) = P(t_m < t) = P_{0m}(t). \tag{7.8}$$

Для анализа удобно представить процесс разрушения в виде последовательных переходов из состояния 0 в состояние m (7.4). Тогда [5]

$$t_m = \tau_0 + \tau_1 + \ldots + \tau_{m-1} = \sum_{j=0}^{m-1} \tau_j \,, \tag{7.9}$$

где τ_0 – время перехода из состояния 0 в 1 и т. д.

Так как величины τ_j являются независимыми случайными величинами, то среднее значение и среднее квадратическое отклонение для времени разрушения [5]

$$\overline{t_m} = \sum_{j=0}^{m-1} \overline{\tau_j} \,; \tag{7.10}$$

$$s_m = s[t_m] = \left\{ \sum_{j=0}^{m-1} s^2[\tau_j] \right\}. \tag{7.11}$$

Следует отметить, что при числе состояний $m > 4$ можно приближенно представить сумму независимых случайных величин в виде нормальной случайной величины. Тогда [5]

$$P_{0m}(t) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t-t_m}{s_m}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx, \tag{7.12}$$

где $\overline{t_m}, s_m$ определяются равенствами (7.10) и (7.11).

Надежность систем определяется, прежде всего, надежностью составных элементов, их количеством и структурой самой схемы. В большинстве случаев систему называют простой, если она может быть представлена в блок-схеме надежности как цепочка последовательно соединенных элементов. К числу простейших структур относится одиночная система или последовательное соединение агрегатов и деталей (рис. 19). Последовательным называется такое соединение, при котором система выходит из строя, если откажет

хотя бы один агрегат или деталь. При этом понятие «соединение» в структурных схемах надежности отличается от аналогичного понятия в электрических схемах и отображает не фактическое соединение, а лишь условную связь.

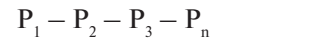


Рис. 19. Схема последовательного соединения элементов

При последовательном соединении агрегатов и деталей (элементов схемы) вероятность безотказной работы системы P_C определяется как вероятность одновременного появления ряда событий, заключающихся в безотказной работе элементов P_i, составляющих систему,

$$P_C = P_1 P_2 ... P_N = \prod_{i=1}^{N} P_i \,. \qquad (7.13)$$

Из формулы (7.13) можно сделать следующие выводы.

1. Вероятность безотказной работы системы уменьшается с увеличением числа последовательно соединенных элементов. Следовательно, при разработке объекта необходимо стремиться к возможно меньшему числу последовательно соединенных элементов.

2. Вероятность безотказной работы системы всегда меньше вероятности безотказной работы наименее надежного элемента. Следовательно, при разработке объекта необходимо выявлять наименее надежный элемент и повышать вероятность его безотказной работы.

8. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ИЗДЕЛИЯ

В теории надежности рассматриваются работоспособное, исправное, неисправное и предельное состояния объекта.

Предельное состояние объекта – состояние, при котором его дальнейшее применение по назначению или восстановление недопустимо или нецелесообразно. Эксплуатация объекта, находящегося в предельном состоянии, невозможна или нецелесообразна из-за неустранимого снижения безопасности или эффективности. Использование объектов по назначению всегда сопровождается расходованием их ресурса и переходом в неработоспособное предельное состояние в результате постепенного отказа из-за старения и изнашивания материалов. Объект может оказаться в неработоспособном предельном состоянии в результате внезапного отказа из-за превышения действующей нагрузкой несущей способности.

Возможны следующие предельные состояния конструкции при оценке вероятности безотказной работы:

– по прочности – по нормальным и касательным напряжениям;
– устойчивости общей и местной;
– жесткости;
– сопротивлению усталости;
– длительной прочности;
– износу и др.

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации; это не касается требований, не влияющих на эксплуатационные показатели, например дефекты окраски и т. д.

Любое техническое устройство выполняет заданные ему функции при рабочих параметрах элементов (деталей, узлов), значения которых находятся в определенных пределах допусков (рис. 20).

Совокупность значений определенных функциональных выходных параметров $Y_j(t)$, $j = \overline{1,n}$ определяет работоспособность элемента. Условие работоспособности можно представить в виде

$$Y_{jH}(t) < Y_j(t) < Y_{jB},$$

где Y_{jH}, Y_{jB} – соответственно нижний и верхний допуски на j-й выходной параметр элемента.

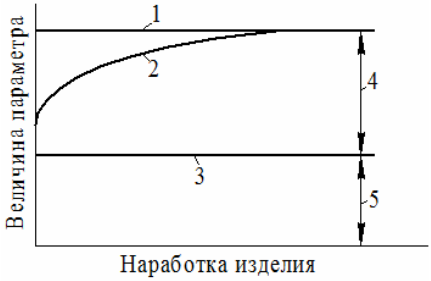


Рис. 20. Изменения параметра изделия в зависимости от наработки:
1 – верхнее допустимое значение; 2 – изменение параметра;
3 – нижнее допустимое значение; 4 – допуск; 5 – отказ изделия

Работоспособность реальных технических систем определяется комплексным проявлением большого числа параметров, часть из которых контролировать невозможно или чрезвычайно сложно. В связи с этим на практике часто возникает задача выбора из всей совокупности основных параметров ограниченного множества параметров, определяющих работоспособность системы с некоторой вероятностью.

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

Исправное и работоспособное состояния не тождественны. Исправное состояние включает работоспособное состояние. Исправный объект обязательно работоспособен, работоспособный объект может быть неисправным.

Наибольший интерес с точки зрения теории надежности представляет переход изделия из работоспособного состояния в неработоспособное и, наоборот, из неработоспособного состояния в работоспособное (рис. 21), определяющие время безотказной работы.

Под несущей способностью (сопротивляемостью) в широком смысле обычно понимают свойство конструктивного элемента воспринимать действующие нагрузки.

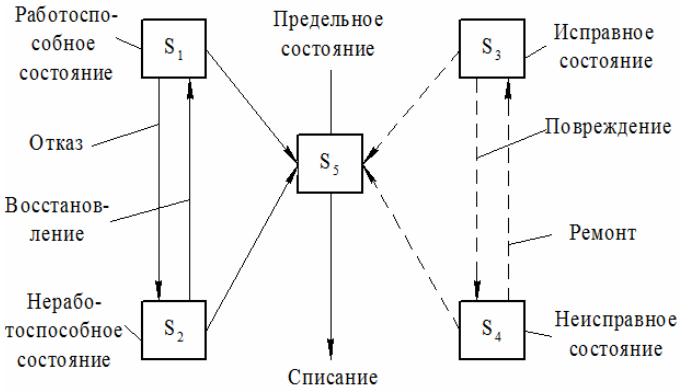


Рис. 21. Упрощенный граф состояний изделия
в системе эксплуатации

Под действием внешних нагрузок в изделиях и их элементах возникают механические напряжения, которые зависят от величины усилий и геометрических характеристик элемента. Так как разные материалы способны без разрушения воспринимать различные напряжения, механические характеристики материалов (пределы прочности, текучести, ползучести, удлинение и т. д.) определяют способность материала сопротивляться действию внешних нагрузок. Для механических элементов и систем, предназначенных для восприятия и передачи различного рода нагрузок (механических, гидравлических, тепловых, радиационных и других), критериями несущей способности являются характеристики прочности.

Таким образом, под «несущей способностью» механических систем и элементов в узком смысле будем понимать механические характеристики материала и геометрические размеры элементов. Постановка и решение вопросов качества и надежности изделия основаны на представлении о прочности изделий, под которой понимается их свойство сопротивляться внешним нагрузкам различной физической природы и сохранять при этом в заданных пределах значения всех характеристик качества и надежности.

Несущая способность элемента должна измеряться в тех же единицах, что и нагрузка. Как известно, сосредоточенные нагрузки измеряют в единицах силы; нагрузки, распределенные по площа-

ди элемента, – в единицах силы, отнесенных к единице площади; нагрузки, распределенные по длине элемента, – в единицах силы, отнесенных к единице длины. В качестве нагрузки и несущей способности должны быть приняты одни и те же физические параметры, например, если S – рабочее давление, то R – давление разрушения; если S – сжимающее усилие, то R – критическая сила потери устойчивости и т. п. Вместе с тем выбор той или иной пары параметров в качестве S и R в известной мере произволен. Так, для сферического баллона диаметром $D_Б$ и толщиной стенки δ, нагруженного внутренним давлением p, можно считать нагрузкой давление p, напряжение $p \cdot D/(4\delta)$ или усилие $p\pi D^2/4$, представляя соответственно несущую способность как разрушающее давление, предел прочности или разрушающее усилие. Все три варианта правомерны, но в первом из них более четко разделены внешнее воздействие и параметры конструкции.

Во многих случаях несущая способность детали определяется как

$$S_0 = \sigma_{ПР} F,$$

где $\sigma_{ПР}$ – предельное напряжение (предел текучести, временное сопротивление, предел усталости и т. д.); F – геометрический фактор расчетного сечения (момент сопротивления, площадь сечения детали).

При расчете деталей машины на прочность и жесткость в основе лежит простейший закон Гука о пропорциональности напряжения и деформации, причем характеристиками материала в этой закономерности являются только модуль упругости и коэффициент Пуассона. На основе закона Гука разработаны сложные теории расчета различных конструкций, оболочек, статически неопределимых систем, работающих в разнообразных условиях нагружения. Трудности расчетов возникают в связи с некоторыми характерными свойствами материалов (например, композитов), в особенности из-за различного в общем случае характера разрушения материала в каждом из главных направлений его симметрии, отсутствия текучести и др.

Последний факт вызывает необходимость рассмотрения несущей способности конструкции с вероятностных позиций. Помимо

этого вероятностный подход, независимо от природы рассматриваемых материалов, является наиболее рациональным и универсальным методом, пригодным в любых случаях. Основная трудность анализа связи между нормами прочности в их традиционном смысле и вероятностью состоит в формализации понятия «расчетный случай нагружения». Словесно расчетный случай нагружения определяется как случай некоторого среднего нагружения среди наибольших встречающихся в эксплуатации нагрузок. Применительно к данному типу конструкции понятие расчетного случая конкретизируется четким указанием характера нагружения и связи величины нагрузки с некоторыми (часто весовыми или габаритными) характеристиками конструкции.

Физический закон можно рассматривать как описание природы с детерминистических позиций. Вероятностная интерпретация физического закона становится необходимой лишь тогда, когда переменные, определяющие явление, нельзя задать однозначно. Использование вероятностных расчетов при проектировании означает, что величины, используемые для оценки несущей способности конструкции, являются случайными и их точное значение неизвестно. Вероятностные параметры выбирают на основе статистических исследований. Этому противостоит детерминированное проектирование, при котором считается, что величины, определяющие несущую способность конструкции, определены точно и не являются случайными. Детерминированные величины определяют на основании имеющейся информации и накопленного опыта.

Во многих инженерных задачах совмещают оба подхода. Это является следствием сложности одновременного учета погрешностей расчета и конструирования, ограниченности контроля при изготовлении, сборке и эксплуатации – словом, отсутствия полной определенности в условиях для точного определения прочности материала и величины действующих нагрузок. Если надежность конструкции сформулировать как требование, чтобы она «никогда не разрушалась», то это, очевидно, приведет к требованию бесконечно большой прочности и, следовательно, к бесконечно большой массе конструкции. Таким образом, необходимо согласиться на что-то меньшее. Требование «не разрушаться никогда», разумеется, обычно заменяют

на требование «не разрушаться при условии». Как правило, разрушение конструкции допускается только в том случае, когда нагрузка в процессе ее эксплуатации существенно выйдет за рамки ожидаемых границ для определенного типа нагрузок. При таком подходе надежность конструкции является вероятностью того, что ее несущая способность в определенных условиях и в течение заданного времени превышает уровень действующих нагрузок.

Если надежность конструкции охарактеризовать 0 (абсолютная ненадежность) и 1 (абсолютная надежность), то возможность реализации каждого из этих чисел между этими границами можно сопоставить с соответствующей вероятностью. Если все возможные значения надежности связать с определенными вероятностями, то получим распределение надежности. Степень достоверности, что надежность принимает определенное значение R, характеризуется обычно площадью под кривой распределения между выбранным значением R и единицей. Общая площадь под кривой распределения равна единице, поскольку она характеризует все возможные исходы для конкретной ситуации.

Статистический подход к оценке прочности механической системы основывается на использовании условия разрушения

$$\varphi(\alpha_1 ... \alpha_r) = R(\alpha_1 ... \alpha_k) - Q(\alpha_{k+1} ... \alpha_r) \le 0, \qquad (8.1)$$

в котором несущая способность R и нагрузка на конструктивный элемент Q зависят от параметров $\alpha_1 ... \alpha_r$.

Неравенство (8.1) имеет стохастический характер, и вероятность его выполнения находится как

$$P(\varphi < 0) = \int\limits_{\varphi(\alpha_1,...,\alpha_r)<0} ... \int p(\alpha_1 ... \alpha_r) d\alpha_1 ... d\alpha_r \,, \qquad (8.2)$$

где $p(\alpha_1 ... \alpha_r)$ – совместная плотность распределения параметров $\alpha_1 ... \alpha_r$, вычисленная для генеральной совокупности или по выборкам некоторого объема с определенной доверительной вероятностью.

Величина $P(\varphi < 0)$ обычно вычисляется как вероятность разрушения при запасе прочности, определяемом по средним значениям нагрузки и прочности $\overline{n} = \overline{R} / \overline{Q}$.

Надежность конструкции может рассматриваться как вероятность того, что ее несущая способность превосходит действующую нагрузку, то есть надежность конструкции есть вероятность

того, что прочность материала превышает величину действующих напряжений.

Несущая способность элементов обычно снижается с течением времени под влиянием изнашивания, коррозии, развивающихся трещин и других явлений.

Условия успешного функционирования (условия неразрушения) часто формулируются в виде соотношений, отражающих требование непревышения некоторой функцией ее допустимого значения:

$$U = f(\overrightarrow{\sigma^*}, \overrightarrow{\varepsilon^*}, \overrightarrow{\sigma^*_\partial}, \overrightarrow{\varepsilon^*_\partial}) > 0, \qquad (8.3)$$

где $\overrightarrow{\sigma^*} = f_\sigma(x, y, z, \tau)$, $\overrightarrow{\varepsilon^*} = f_\varepsilon(x, y, z, \tau)$ и $\overrightarrow{\sigma^*_\partial}, \overrightarrow{\varepsilon^*_\partial}$ – поле напряжений, поле деформаций и поля допустимых значений для $\overrightarrow{\sigma^*}$ и $\overrightarrow{\varepsilon^*}$; $\tau \in [\tau_0, \tau_P]$ – отрезок времени от начала τ_0 функционирования до момента τ_P его окончания; x, y, z – координаты точки конструкции.

Для плоской задачи теории упругости в качестве элементов пространства качества естественно выбрать главные напряжения $\sigma_1(t)$ и $\sigma_2(t)$ в некоторой характерной точке. Требование отсутствия пластических деформаций определяет допустимую область в виде, например, шестиугольника Треска-Сен-Венана или эллипса Мизеса (рис. 22).

При использовании критерия Мизеса вероятность безотказной работы находится как вероятность невыброса двумерного процесса $v(t) = \{\sigma_1(t), \sigma_2(t)\}$ из эллиптической области:

$$P(t) = P\{\sqrt{\sigma_1^2(t) + \sigma_2^2(t) - \sigma_1(t)\sigma_2(t)} < \sigma_{0,2}; t \in [0, T]\}.$$

Можно считать установленным, что разрушение только от нормальных напряжений, как и только от касательных, практически невозможно. Если пластическая деформация, вызываемая касательными напряжениями, разрыхляет и готовит материал к разрыву, то нарушение сплошности материала происходит под действием нормальных растягивающих напряжений [5].

В общем случае конструкция нагружается системой внешних нагрузок, которые вызывают сложное напряженное состояние ее элементов. Разрушение элемента конструкции может возникнуть от всевозможных состояний с различной вероятностью (рис. 23).

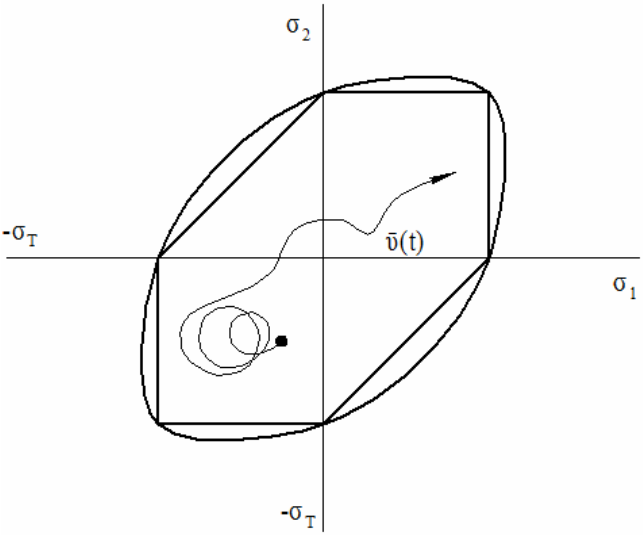


Рис. 22. Графическая интерпретация критерия Мизеса

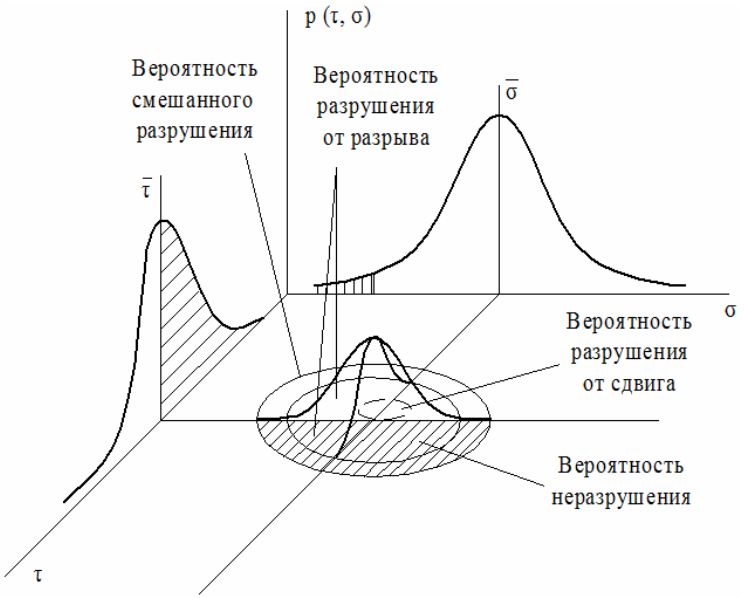


Рис. 23. Схема, иллюстрирующая расчет вероятностей разрушения при действии нормальных и касательных напряжений

Для оценки вероятности безотказной работы при возможных разрушениях от нескольких предельных состояний, могущих вызвать отказ в конструкции, применяется метод фиктивных элементов и узлов.

Фиктивным элементом называется реальный элемент, рассматриваемый лишь в одном предельном состоянии (имеющий лишь один вид отказов). Если тот же реальный элемент может иметь и другой вид отказов, то вводится другой фиктивный элемент, находящийся в другом предельном состоянии. В общем случае один реальный элемент может быть заменен несколькими фиктивными (по числу имеющихся предельных состояний).

Все фиктивные элементы в системе соединены последовательно, так как отказ любого из них приводит к отказу реального элемента. При образовании системы из фиктивных элементов и приложении к ней реальных внешних сил выявляется зависимость по надежности между этими элементами, что и позволяет составить функцию надежности системы и выполнить расчет по вероятности безотказной работы.

Структурная схема соединения фиктивных элементов показана на рис. 24.

1-й ф. э. – 2-й ф. э. – 3-й ф. э. – 4-й ф. э.

Рис. 24. Структурная схема соединения фиктивных элементов

Численное значение надежности реального элемента при нескольких возможных видах отказов можно определить в соответствии с выражением для последовательного соединения элементов:

$$H_{Э} = H_{1Ф.Э} H_{2Ф.Э} \ldots H_{nФ.Э} = \prod_{i=1}^{n} H_{iФЭ},$$

где $H_{iФ.Э}$ – численное значение надежности реального элемента при определенном виде отказа; n – число возможных отказов по различным предельным состояниям.

9. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

На надежность изделий оказывают влияние все технологические процессы и режимы, начиная от металлургических процессов и получения исходных материалов и кончая операциями сборки деталей и узлов изделия.

Современные технологические процессы изготовления изделий, начиная от обработки заготовок и кончая финишными операциями, сопровождаются, как правило, значительными температурными и силовыми воздействиями на деталь при высоких требованиях к точности и производительности процесса.

Затраты энергии, необходимые для осуществления данного технологического процесса, приводят, как правило, к целому ряду побочных явлений, которые изменяют свойства изделий, создают в них остаточные напряжения, искажают структуру материала, приводят к появлению дефектов самого разнообразного характера.

Многоэтапность технологического процесса приводит иногда к тому, что последующие операции не устраняют всех последствий от воздействия предыдущих операций. В результате возникает «технологическая наследственность», т. е. сохранение геометрических, прочностных и других показателей качества изделия, характерных для отдельных этапов технологического процесса. Поэтому изделие несет в себе следы остаточных явлений технологического процесса, которые при эксплуатации могут проявиться в виде отказа. Нередко такой отказ воспринимается как внезапный, хотя на самом деле он относится к категории постепенных (износовых) отказов, так как зависит от длительности эксплуатации изделия.

Многие кажущиеся внезапными отказы изделий нельзя устранить улучшением, например, методов эксплуатации. Они являются следствием остаточных явлений, возникающих при изготовлении изделий.

Чем выше требования к надежности изделий, тем большее число параметров должно быть оговорено техническими условиями, так как должны быть выявлены основные взаимосвязи между эксплуатационными и технологическими параметрами (рис. 25).

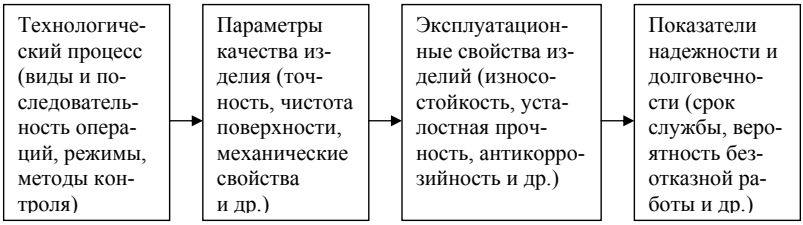


Рис. 25. Зависимость показателей надежности от уровня технологического процесса

Конечно, тип, характер и интенсивность внешнего воздействия существенно влияют на законы распределения времени безотказной работы отдельных элементов или всего изделия в целом, но если внешнее воздействие не выходит за рамки определенного динамического диапазона, можно в силу непрерывности всех физических процессов считать, что основные вероятностные характеристики элементов и изделия остаются неизменными качественно, а меняются лишь количественные значения различных параметров, например, интенсивности отказов или физической долговечности изделия. Другими словами, пока физика процессов, приводящих к отказам, остается неизменной, основные вероятностные характеристики элементов и изделия качественно не меняются.

Рациональная технология позволяет уменьшить дисперсию свойств изделий, сделать их более однородными.

10. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ

Изделие невозможно изолировать от влияния среды, где оно работает, от действия остаточных явлений, которые есть следствие технологических процессов, применяющихся при изготовлении. Все виды энергии (механическая, тепловая, химическая, электромагнитная) воздействуют на изделие и вызывают в нем обратимые и необратимые процессы, снижающие ее начальные характеристики.

Трудности создания статистической теории деформирования и разрушения твердых тел обусловлены, во-первых, гораздо более сложным, недостаточно изученным взаимодействием первичных элементов в твердом теле, чем, например, взаимодействие молекул в газе; во-вторых, трудности связаны с тем, что, за исключением явлений упругого деформирования и упругого последействия, изучаемые процессы относятся к категории необратимых. Задача, следовательно, состоит в построении теории, описывающей преимущественно необратимые процессы в твердом теле: процессы пластических деформаций, кинетику распространения усталостной трещины и т. п. [9].

Обычно обратимые изменения параметров элементов рассматривают как функции условий их работы (температура, влажность, радиация, частота и др.), а необратимые – как функцию этих же условий работы и времени.

Оценка надежности технических систем должна быть основана на изучении энергетических воздействий, которым подвергается изделие в процессе эксплуатации [6]. Под действием различных видов энергии могут развиваться во времени такие процессы, как деформация, изнашивание, коррозия, изменение физических свойств и др.

По существу, все процессы, определяющие состояние технических систем, носят термодинамический характер. Именно термодинамический подход обладает наибольшей общностью и в то же время позволяет выразить термодинамические характеристики через конкретные физические параметры [8].

Согласно соотношению

$$J_i = \sum_k \alpha_{ik} X_k$$

скорость любого процесса J_i определяется кинетическими α_{ik} и термодинамическими X_k факторами. Величина α_{ik} имеет обобщенный смысл и отражает, в частности, роль диффузионной и химической кинетики. Вторая величина характеризует термодинамический стимул процесса.

В последнее время для выбора теоретического распределения по опытным данным для оценки ресурса систем применяют энтропийный подход. Если использовать классическое понятие энтропии, необходимо рассмотреть изолированную систему, включающую в себя организм вместе с окружающей его средой.

Функциональный процесс перехода состояний системы может быть описан энтропией. Поскольку реальные процессы эксплуатации изделия вносят вполне определенные пропорции между формируемыми параметрами, методически правомерно рассматривать энтропию как функцию состояния системы. Моменту отказа любого технического устройства предшествуют необратимые изменения. Из термодинамических параметров энтропия лучше всего описывает накопление необратимых изменений в замкнутой системе. Использование понятия энтропии как функции состояния системы, равно как и меры ее качества, позволяет представить любое изменение состояния системы как результат бесконечно большого числа бесконечно малых изменений. При каждом таком бесконечно малом изменении состояния система либо накапливает, либо теряет свое качество [7].

В общем случае изменение энтропии [8]

$$ds = ds_e + ds_i,$$

где ds_e – изменение энтропии, обусловленное обменом с окружающей средой (энтропийный обмен системы с окружающей средой); ds_i – производство энтропии, вызванное необратимыми процессами внутри системы.

Величина ds_i/dt является скоростью накопления необратимых изменений [8]. Поэтому через данную величину можно выразить

скорость накопления повреждений. Далее для краткости вместо s_i будем использовать обозначение s.

Известно, что при совершении необратимых процессов в системе условие потери работоспособности определяется выражением

$$\Delta \ell = T_0 \Delta S,$$

где ΔS – увеличение энтропии системы в необратимом процессе; T_0 – температура среды.

Рост энтропии определяет деградацию системы. Таким образом, величина энтропии системы в данном ее состоянии определяет максимальный запас работоспособности этой системы.

Согласно А. Эйнштейну, для изолированной системы, близкой к состоянию равновесия,

$$P = P_0 \exp \frac{\Delta S}{k}, \qquad (10.1)$$

где P_0 – вероятность состояния системы в равновесии;
$\Delta S = S(\alpha) - S_0$; S_0 – значение энтропии системы в состоянии равновесия.

Из формулы (10.1)

$$\Delta S = k \ell n \frac{P}{P_0}.$$

Тогда

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k}{P} \frac{dP}{dt}.$$

Интенсивность отказов

$$\lambda = -\frac{dP}{dt} \frac{1}{P}$$

или

$$\lambda = \frac{dQ}{dt},$$

где P – вероятность отсутствия отказа; Q – вероятность отказа.

Для систем, в которых протекают линейные необратимые процессы, скорость изменения вероятностного состояния системы

$$\frac{dP}{dt} = \beta (P_0 - P), \qquad (10.2)$$

где β – константа.

При граничном условии $P_\infty = P_0$ из формулы (10.2) имеем

$$P = P_0[1 - C\exp(-\beta t)],$$

где C – произвольная положительная константа.

Учитывая, что предположение (10.2) сделано для систем, находящихся вблизи от состояния равновесия, можно пренебречь в знаменателе членом $C\exp(-\beta t)$.

$$\sigma = \frac{1}{V}\frac{d_i S}{dt} = \frac{k}{P}\frac{dP}{dt}. \qquad (10.3)$$

Подставляя (10.2) в (10.3), получаем

$$\sigma = \alpha\left(\frac{P_0}{P} - 1\right), \qquad (10.4)$$

где $\alpha = k\beta$.

Разлагая в ряд значение энтропии S около состояния S_0, имеем

$$S = S_0 + \delta S + \frac{1}{2}\delta^2 S + \ldots$$

Избыточная энтропия $\delta^2 S$ определяет вероятность малых флуктуаций около исходного состояния. Распространяя уравнение Эйнштейна на неравновесные условия, эту вероятность можно записать в виде

$$P \cong e^{\delta^2 S/2k},$$

где k – константа Больцмана.

При вероятностном описании процесса разрушения наиболее полной характеристикой его является вероятность безотказной работы [8]:

$$P(t) = P_0 \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau\right], \qquad (10.5)$$

где P_0 – вероятность неразрушения в момент приложения нагрузки; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов.

Если параметром протяженности процесса нагружения выбрать не время t, а энтропию s, то соответственно запишем [8]

$$P(s) = P_0 \exp\left[-\int_0^s \lambda(x)dx\right].$$

11. О ПРОГНОЗИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ

Важной проблемой является использование методов неразрушающего контроля для определения степени накопленных повреждений в элементах конструкций и прогнозирования на этой основе моментов появления отказов.

Обычно для оценки надежности изделий используют статистические данные по отказам, без анализа процессов их формирования. Такой подход не создает основы для прогнозирования надежности и вскрытия причин возникновения отказов [4]. Оценка характеристик сохраняемости путем прогнозирования их на основании данных, полученных при обработке выборок, урезанных по времени наблюдения, приводит к весьма малой состоятельности получаемых при этом оценок.

Прогнозирование надежности конструкций и изделий можно производить как на стадии проектирования и изготовления, так и на стадии эксплуатации. На этапе проектирования расчет надежности производится по задаваемым статистическим параметрам величин, используемых в расчете и получаемых опытным путем для данных материалов. Расчет позволяет снизить стоимость разработки изделия в результате оптимизации программы испытаний и производственного контроля менее надежных элементов, однако при непосредственном испытании надежность изделия можно определить наиболее точно, так как расчетная оценка обладает меньшей точностью, чем экспериментальная, ввиду того что параметры при расчете часто не соответствуют параметрам, получаемым после изготовления изделия.

Задача оценки работоспособности контролируемой системы не будет решена полностью, если не будет осуществлено прогнозирование изменения работоспособности с течением времени эксплуатации.

Работоспособность реальной системы характеризуется значениями параметров, выражающих состояние отдельных узлов и элементов. Таким образом, прогнозирование степени работоспособности системы сводится к прогнозированию изменения отдельных характеристик или совокупности параметров. При этом существенную роль играет постановка задачи прогнозирования, которая определяет математический аппарат и пути ее решения, практичес-

кую реализацию полученных результатов и, безусловно, эффективность решения задачи.

Подготовка и решение задачи прогнозирования складываются в основном из следующих четырех этапов [14].

1. Сбор и анализ имеющейся априорной информации о закономерностях изменений параметров контролируемых систем, об изменении характеристик функций распределения.

2. Количественный и качественный анализ текущей информации о контролируемых параметрах. Качественный анализ дает представление о тенденции изменения контролируемого параметра, после чего можно принять решение о соответствующей математико-статистической обработке контролируемой информации. Количественный анализ, включающий в себя выбор способа обработки, помогает более точно оценить закономерности изменения контролируемых параметров.

3. Выбор метода прогнозирования, связанный с выбором математического аппарата решения задачи.

4. Осуществление прогнозирования и оценка возникающих при этом ошибок.

Сами прогнозы выполняют обычно методами математической физики, а величины расчетных параметров, характеризующих физические свойства элементов моделей, назначают с помощью статистических методов. Считают, что точность получаемых результатов определяется в основном выбором расчетных параметров, и статистический подход к их назначению позволяет связать статистические оценки их достоверностей с надежностью прогнозов. Эти оценки, в свою очередь, зависят от объемов и методик исследования, что позволяет организовывать изыскания в соответствии с требованиями к надежности обосновываемых прогнозов. Иными словами, считают, что возможна замкнутая оценка достоверности прогнозов, т. е. оценка, опирающаяся только на свойства самого метода прогноза и качество информации об объекте [3].

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы специфические особенности теории надежности?
2. Каковы особенности системного подхода к изучению физических процессов в изделиях?
3. Что такое состояние работоспособности и состояние отказа элемента (технической системы)?
4. Что такое дискретные и непрерывные состояния системы?
5. Что такое обратимые и необратимые переходы системы из одного состояния в другое?
6. Что показывает граф состояний системы?
7. Как выглядит упрощенный граф состояний изделия в процессе эксплуатации?
8. Что такое работоспособное, исправное, неисправное и предельное состояния изделия?
9. Что такое надежность изделия?
10. Что такое интенсивность отказов?
11. Какие есть стандартные показатели надежности и долговечности?
12. Что такое вероятность безотказной работы?
13. Какие факторы определяют надежность и долговечность изделия?
14. Каковы условия отказа элемента технической системы?
15. Как классифицируются причины отказов, связанных с технологией производства?
16. Какова зависимость показателей надежности от уровня технологического процесса?
17. Каковы особенности вероятностного подхода к оценке несущей способности конструкции?
18. Что такое долговечность изделия?
19. Что такое ресурс объекта?

20. Как характеризуется закон распределения и плотность распределения случайной величины?
21. Что такое деградационные функции материалов и нагруженных конструкций?
22. Что такое принцип суммирования парциальных разрушений?
23. Каковы особенности прогнозирования надежности изделия?
24. Каковы особенности кинетической теории разрушения?
25. Какие существуют причины возникновения внезапных отказов?
26. Что такое несущая способность конструкции?
27. Что такое вероятность отказа изделия?
28. Какие существуют причины разброса механических характеристик материалов, узлов и соединений конструкций?
29. Каковы условия успешного функционирования (условия неразрушения) конструкции?
30. Какие существуют типы распределения механических характеристик материала?
31. Как классифицируются отказы элементов?
32. Каковы условия работоспособности объекта?
33. Какие есть схемы возникновения отказов?
34. Какие есть структурные схемы надежности?
35. Как определяется вероятность безотказной работы при последовательном соединении элементов?
36. Что такое предельное состояние материала?
37. Какие есть критерии предельного состояния?
38. Что такое статистическая модель разрушения?
39. Что такое физико-математические модель процессов разрушения материалов?
40. Что такое термодинамический подход к оценке надежности?

41. Каковы варианты взаимного распределения нагрузки и прочности?
42. Что такое марковские модели функционирования технической системы?
43. Каковы основные задачи теории надежности?
44. Каковы особенности статистических и физических методов оценки надежности?
45. Что такое метод фиктивных элементов?
46. Каковы достоинства и недостатки нормального закона распределения?
47. Каковы различия понятий «технический ресурс» и «срок службы»?
48. Каковы основные показатели безотказности, ремонтопригодности и долговечности?
49. Что такое гамма-процентный ресурс?
50. Что такое конструкционная, технологическая и эксплуатационная надежность сварных и паяных конструкций?

Библиографический список

1. Кузьмин, Р.В. Расчет надежности судового оборудования по малым выборкам / Р.В. Кузьмин, В.П. Гром. – Л. : Судостроение, 1976. – 96 с.
2. Болотин, В.В. Статистические методы в строительной механике / В.В. Болотин. – М. : Госстройиздат, 1961. – 199 с.
3. Гороховский, В.М. Математические методы и достоверность гидрогеологических и инженерно-геологических прогнозов / В.М. Гороховский. – М. : Недра, 1977. – 76 с.
4. Проников, А.С. Перспективы научных исследований по надежности машин / А.С. Проников. // Надежность и контроль качества. – 1977. – № 7.
5. Острейковский, В.А. Физико-статистические модели надежности элементов ЯЭУ / В.А. Острейковский. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 200 с. – (Надежность и качество).
6. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
7. Молдаванов, О.И. Качество сооружения магистральных трубопроводов / О.И. Молдаванов. – М. : Недра, 1979. – 223 с.
8. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. – М. : Стройиздат, 1987. – 264 с.
9. Кузнецов, А.А. Надежность конструкции баллистических ракет : учеб. пособие для вузов / А.А. Кузнецов. – М. : Машиностроение, 1978. – 256 с.
10. Биргер, И.А. Применение теории случайных процессов для описания разрушения. Прочность материалов и конструкций / И.А. Биргер. – Киев : Наукова думка, 1975. – С. 297–314.
11. Коваленко, Н.П. Физические процессы и надежность объектов / Н.П. Коваленко // Надежность и контроль качества. – 1980 – № 7. – С. 3–12.
12. Ульянов, С.В. Информационные и термодинамические аспекты качественной теории эволюционных моделей развивающихся динамических систем управления / С.В. Ульянов. – [Б. м.] : Техническая кибернетика (Итоги науки и техники), 1978.

13. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
14. Кордонский, Х.Б. Вероятностное обоснование норм прочности / Х.Б. Кордонский, И.Е. Дышлер, Г.В. Громов // Прочность материалов и конструкций. – Киев : Наукова думка, 1975. – С. 208–222.
15. Переверзев, Е.С. К вопросу долговечности материалов с позиций термодинамики необратимых процессов / Е.С. Переверзев // Прочность и долговечность конструкций. – Киев : [б. и.], 1980. – с. 141-151.

Содержание

Введение.....3
Условные обозначения.....7
1. Основные законы распределения случайных величин.....8
2. Понятие «надежность». Задачи теории надежности.....23
3. Показатели надежности.....27
4. Отказы технических систем.....39
5. Линейная гипотеза накопления повреждений 48
6. Физико-химические модели надежности 55
7. Система. Состояния системы 73
8. Несущая способность изделия.....83
9. Технологические методы обеспечения надежности.....92
10. Термодинамические подходы к оценке надежности.....94
11. О прогнозировании надежности.....98
Вопросы для самоконтроля.....100
Библиографический список.....103

Учебное издание

Лучкин Рудольф Сергеевич

ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ В ТЕХНИКЕ

Учебное пособие

Редактор *Т.Д. Савенкова*
Технический редактор *З.М. Малявина*
Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 29.03.013. Формат 60×84/16.
Печать оперативная. Усл. п. л. 6,16.
Тираж 100 экз. Заказ № 1-19-12.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14