

**Министерство образования и науки
Российской Федерации**

**ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

Новомосковский институт (филиал)

Лобанов Н.Ф., Каменский М.Н.

**ОСНОВЫ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ
ОБОРУДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Учебное пособие

**Новомосковск
2014**

УДК 66.02
ББК 34.7
О 753

Рецензенты:

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
главный специалист по катализаторам
Ефремов В.Н.
(ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР»)

доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Техническая механика»
Лукиенко Л.В.
(НИ(филиал) ФГБОУ ВПО «РХТУ им. Д.И. Менделеева»)

О 753 Основы эксплуатационной надёжности оборудования химических производств – 2-е изд., перераб. и доп. Учебное пособие. Лобанов Н.Ф., Каменский М.Н. / Новомосковский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева». Новомосковск, 2014. 80 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы надежности оборудования. В первой части содержатся основные сведения о надежности, во второй – представлены основные процессы, вызывающие разрушение конструкций, в третьей – содержатся методы повышения надежности оборудования.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения.

УДК 66.02
ББК 34.7

© Новомосковский институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический
университет им. Д.И.Менделеева», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Основные термины и определения теории надежности	6
1.1. Основное уравнение надежности	11
1.2. Структурные схемы надежности	13
1.3. Порядок нормирования уровня надежности сложных систем	15
1.4. Законы отказов	16
1.4.1. Экспоненциальный закон распределения отказов	16
1.4.1.1 Расчет надежности и среднего срока службы при последовательном и параллельном соединении элементов	18
1.4.1.2 Графический метод определения интенсивности отказов при экспоненциальном законе	19
1.4.2. Нормальный закон распределения отказов	20
1.4.3. Закон распределения отказов Вейбулла	22
1.5. Временные характеристики надежности	23
1.6. Классификация изделий химического машиностроения по надежности	26
1.7. Сбор исходных данных для определения параметров надежности	29
1.8. Форсированные испытания на надежность	29
1.8.1. Сокращение времени испытаний за счет интенсификации процесса	30
1.8.2. Сокращение количества испытываемых объектов, при отсутствии отказов	31
1.8.3. Сокращение количества испытываемых объектов, за счет увеличения продолжительности испытания	32
2. Физика отказов	33
2.1. Обратимые и необратимые процессы	33
2.2. Напряженное состояние поверхностного слоя	36
2.3. Трибологические отказы. Закономерности изнашивания	38
2.4. Основные методы измерения износа	39
2.5. Классификация видов изнашивания	41
2.6. Параметры, влияющие на интенсивность изнашивания	45
2.6.1. Влияние скорости скольжения трущихся поверхностей на интенсивность изнашивания	45

2.6.2.	Влияние контактного давления и механических характеристик материала на интенсивность изнашивания	46
2.6.3.	Влияние температуры контактирующих поверхностей на интенсивность изнашивания	48
2.7.	Прогнозирование срока службы пар трения по критерию износа	48
2.8.	Эрозионное и коррозионное разрушение поверхностей	49
2.8.1.	Эрозионное разрушение материалов	49
2.8.2.	Коррозионное разрушение металлов	50
2.9.	Факторы, ускоряющие коррозию	53
2.10.	Усталостные разрушения конструкций и материалов	54
2.11.	Оценка технического состояния оборудования	58
2.11.1.	Характерные повреждения сосудов и аппаратов	58
2.11.2.	Критерии предельных состояний сосудов и аппаратов	59
2.11.3.	Методы оценки величины повреждений	60
3.	Конструктивные методы повышения надежности	63
3.1.	Проектно-конструктивные методы повышения надежности	63
3.2.	Роль смазки в парах трения	64
3.3.	Технологические методы повышения надежности	65
3.4.	Методы поверхностного деформирования	66
3.5.	Химико-термические и термические методы упрочнения	67
3.6.	Нанесение защитных покрытий	68
4.	Задания для проверки знаний	69
4.1.	Задание № 1	69
4.2.	Задание № 2	73
5.	Литература	77
	Приложение 1.	78
	Приложение 2.	79

Введение

Пособие предназначено для закрепления и углубления знаний в области надежности и долговечности машин и аппаратов химических производств, изучения прикладной теории надежности и методов повышения ее уровня на стадиях конструирования и изготовления оборудования, освоения научных основ анализа состояния оборудования, поддержания его работоспособности путем проведения мероприятий по ремонту и обслуживанию.

Помимо теоретической части в пособии представлены вопросы и задачи, позволяющие закрепить полученные знания.

В процессе изучения пособия у студента появляются возможности:

- использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа, моделирования и экспериментального исследования;
- осваивать и эксплуатировать новое оборудование, принимать участие в наладке, технических осмотрах, текущих ремонтах, проверке технического состояния оборудования и программных средств;
- изучать специальную научно-техническую информацию, анализировать отечественный и зарубежный опыт по инженерным методам повышения надежности и долговечности оборудования.

1. Основные термины и определения теории надежности

С целью единообразного толкования понятий был разработан ГОСТ 27.002 «Надежность в технике. Термины и определения». В статистическом плане мерой надежности является: интенсивность отказов, срок службы, вероятность безотказной работы, ремонтпригодность и т.д.

Надежность характеризуется следующими состояниями и событиями:

Работоспособность – это состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции (функции назначения), сохраняя значения основных параметров в пределах установленных нормативно-технической документацией.

Исправность – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям установленным документацией (ГОСТ, ТУ, паспорт и т.д.). Исправность это понятие более широкое, чем работоспособность.

Неисправное состояние – это состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному требованию документации. Понятие неисправность тесно связано с понятием дефект.

Дефект – каждое конкретное несоответствие изделия или продукции требованиям документации.

Термин применяется:

- а) при техническом контроле на этапах производства;
- б) при ремонтах на стадии дефектации (дефектная ведомость).

Неисправное состояние объекта обязательно связано с наличием одного или более дефектов. Следует различать неисправности вызывающие и не вызывающие отказов.

Отказ – это событие, заключающееся в полной или частичной потере работоспособности.

По физической природе отказы могут быть вызваны:

- разрушением деталей или рабочих поверхностей (усталостное разрушение, износ, коррозия...);
- факторами не связанными с разрушением (отложение солей на стенках теплообменника, ослабление соединений, нарушение регулировки и т.д.).

По характеру отказы различают:

- внезапные (в результате поломки);
- постепенные (в результате процесса старения, деградаций и т.д.).

Постепенный отказ характеризуется наличием закономерного изменения какого-либо параметра объекта (за время предшествующее возникновению отказа). Это позволяет прогнозировать с определенной вероятностью временную границу, за которой следует отказ.

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

В прикладном плане это ожидание нормального функционирования без отказов в течение достаточно большого срока службы (срок службы больше гарантийного срока эксплуатации).

Вывод: подобно качеству продукции надежность есть комплексное свойство объекта, включающее более простые свойства:

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

Безотказность – это свойства объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. При оценке безотказности плановые перерывы в работе не учитываются.

Наработка – продолжительность (время) или объем (по километрам, по циклам, по количеству продукции) работы объекта.

Долговечность – это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленных системах технического обслуживания и ремонта. Для не восстанавливаемых изделий безотказность эквивалентна долговечности.

Сохраняемость – это свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение хранения и транспортировки. Этот показатель особенно важен для запчастей «стареющих» при хранении.

Ремонтпригодность – это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и повреждений, путем проведения технических обслуживаний и ремонтов. Есть две стороны ремонтпригодности: 1) приспособленность к восстановлению; 2) возможность предупреждения отказов через обслуживание и профилактику. Ремонтпригодность изделия на 90% предопределяется и обеспечивается при разработке и изготовлении изделия.

Ремонтируемые объекты – это объекты, для которых проведение ремонтов предусмотрено нормативно-технической документацией.

Неремонтируемые объекты – это объекты, которые в случае отказов или повреждений не подлежат восстановлению и заменяются.

Показатели безотказности.

К ним относятся:

- вероятность отказа – Q_τ ,
- вероятность безотказной работы (ВБР) – P_τ ,
- частота отказов – f_τ ,
- интенсивность отказов – λ_τ ,
- поток отказов – ω_τ , является аналогом λ_τ для ремонтируемых и восстанавливаемых изделий, когда среднее число работающих в интервал времени $\Delta\tau$ включают в себя и число восстановленных изделий.

$$P_\tau = \frac{N_\tau}{N_0},$$

где N_τ – количество объектов, сохранивших работоспособность к моменту времени τ ; N_0 – количество объектов, поставленных на испытания.

$$Q_\tau = \frac{n_\tau}{N_0},$$

где n_τ – количество отказавших объектов за время τ .

Пример: на испытание поставлено N_0 канатов, которые при постоянных условиях износа показали надежность работы в течение 300 часов равную 0,9. Это означает, что первые 300 часов эксплуатации выдержат 0,9 N_0 канатов, а 10% канатов придется заменить в первые 300 часов эксплуатации! Применение термина вероятность безотказной работы без привязки к фактору наработки (τ) и при несоблюдении идентичных условий работы и начальных условий НЕ ИМЕЕТ физического смысла.

Любое изделие в данный момент времени находится только в одном состоянии: или в нерабочем, или в рабочем. С учетом несовместности двух событий: отказ и работоспособное состояние, взаимосвязь параметров определяется уравнением:

$$Q_\tau + P_\tau = 1,$$

т.е. вероятность двух несовместных событий равняется единице.

В статистической трактовке частота отказов запишется как:

$$f_\tau = \frac{n_{\Delta\tau}}{N_0 \Delta\tau},$$

где $n_{\Delta\tau}$ – количество отказавших объектов за промежуток времени $\Delta\tau$.

В отличие от частоты отказов, интенсивность отказов относится не к начальному числу объектов, поставленному на испытание, а к количеству объектов сохранивших работоспособность в рассматриваемый интервал времени.

$$\lambda_{\tau} = \frac{n_{\Delta\tau}}{N_{cp} \Delta\tau},$$

где N_{cp} – среднее число работоспособных элементов в рассматриваемый интервал времени.

$$N_{cp} = \frac{N_{\tau 1} + N_{\tau 2}}{2},$$

где $N_{\tau 1}$ и $N_{\tau 2}$ – количество работоспособных элементов в начале и в конце интервала времени.

Физический смысл интенсивности отказов – это вероятность отказа в очередном интервале времени ($\Delta\tau$) при условии, что невосстанавливаемый объект уже проработал безотказно в течение времени (τ) и отнесенное к длительности очередного интервала времени.

Для ремонтируемых изделий возможные повторные отказы и установка восстанавливаемых деталей в процессе испытаний для характеристики отказов в этом случае вводится поток отказов (ω_{τ}), который в статистической трактовке может быть записан:

$$\omega_{\tau} = \frac{n_{\Delta\tau}}{N_{\tau} \Delta\tau}$$

Поток отказов для восстанавливаемых объектов соответствует интенсивности отказов для невосстанавливаемых объектов, но учитывает повторные отказы.

Связь показателей надежности оборудования представлена на рисунке 1.1:

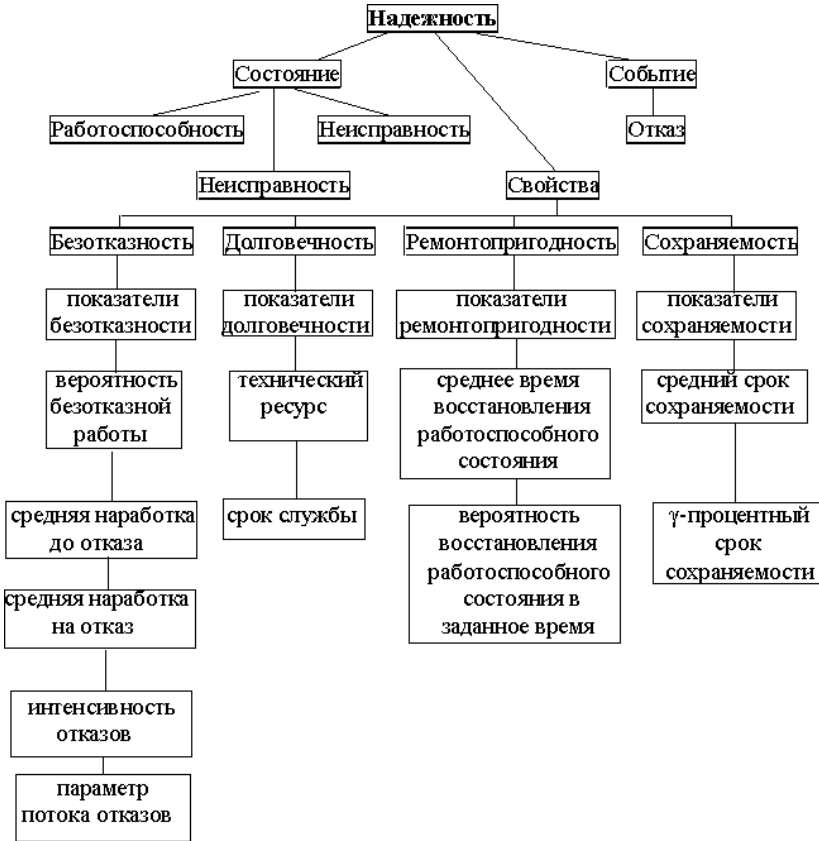


Рис. 1.1. Связь показателей надежности оборудования

Существует определенная зависимость между затратами на создание и эксплуатацию изделия и уровнем его надежности (рис. 1.2).

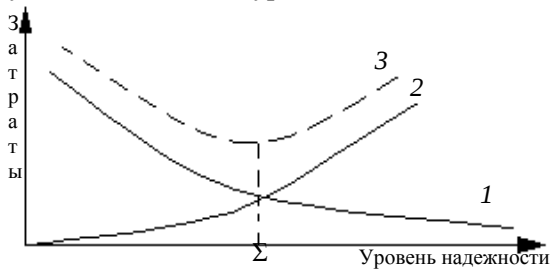


Рис. 1.2. Зависимость между затратами и уровнем надежности изделия

На рисунке 1.2 кривая 1 показывает уменьшение эксплуатационных затрат при увеличении уровня надежности. Кривая 2 показывает увеличение затрат на создание изделия с высоким уровнем надежности. Таким образом, изделия с высоким уровнем надежности требуют меньших затрат на ремонт и обслуживание, но стоят значительно дороже. Кривая 3 получена сложением кривых 1 и 2 и показывает рациональный уровень надежности изделия Σ при рациональном уровне затрат на его создание и эксплуатацию.

1.1. Основное уравнение надежности

Связь между вероятностью отказов и вероятностью безотказной работы, нами уже установлена.

$$P_{\tau} = 1 - Q_{\tau}$$

продифференцируем уравнение по времени:

$$\frac{dP_{\tau}}{d\tau} = \frac{d\left(1 - \frac{n_{\tau}}{N}\right)}{d\tau} = -\frac{1}{N} \cdot \frac{dn_{\tau}}{d\tau}$$

домножим обе части уравнения на N_{τ} :

$$N_{\tau} \frac{dP_{\tau}}{d\tau} = -\frac{N_{\tau}}{N} \cdot \frac{dn_{\tau}}{d\tau} = -P_{\tau} \frac{dn_{\tau}}{d\tau}$$

разделим обе части уравнения на N_{τ} , P_{τ} и домножим на $d\tau$:

$$\frac{dP_{\tau}}{P_{\tau}} = -\frac{dn_{\tau}}{N_{\tau}} d\tau, \text{ преобразуем правую часть уравнения:}$$

$$\frac{dP_{\tau}}{P_{\tau}} = -\lambda_{\tau} d\tau$$

Проинтегрируем полученное уравнение от момента времени $\tau = 0$ до момента времени $\tau = \tau_p$, до истечения которого нас и интересуют показатели надежности.

$$\int_0^{\tau_p} \frac{dP_{\tau}}{P_{\tau}} = -\int_0^{\tau_p} \lambda_{\tau} d\tau$$

$$P(\tau) = e^{-\int_0^{\tau_p} \lambda_{\tau} d\tau}$$

Это основное уравнение надежности, которое связывает ВБР с интенсивностью отказов и ресурсом изделия.

При неизменной интенсивности отказов ($\lambda_i = \text{const}$) запись основного уравнения надежности существенно упрощается:

$$P_{\tau} = e^{-\lambda\tau}$$

Для ремонтируемых изделий уравнения запишутся как:

$$P_{\tau} = e^{-\omega\tau}$$

В результате экспериментального рассмотрения зависимостей интенсивности и потока отказов от времени, как правило, получаются следующие характерные зависимости (рис. 1.3).

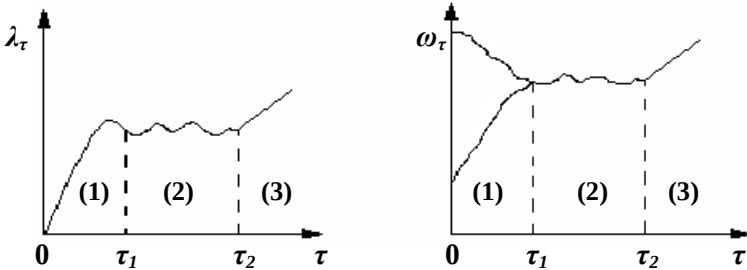


Рис. 1.3. Зависимости интенсивности и потока отказов от времени

Характеристика интенсивности отказов или потока отказов по координатам наработки или времени работы имеет три качественно отличные области: первая: $0 - \tau_1$; вторая: $\tau_1 - \tau_2$; третья: $\tau > \tau_2$

Эти области соответствуют трем качественно отличным режимам эксплуатации изделия:

- для **первой области** (область приработочных износов) характерны отказы в следствии:

- а) дефектов материалов;
- б) производственных дефектов при изготовлении;
- в) естественных разбросов шероховатостей, зазоров и т.п.

Для предотвращения отказов в первой области проводят предварительный отсев деталей перед сборкой на выборочных или сплошных испытаниях.

Условия входного контроля включаются в технические условия (ТУ) на изготовление и сборку изделия. В результате осуществляется отсев заведомо не надежных деталей, что уменьшает количество отказов в период приработки.

- **вторая область** характеризуется случайными отказами, связанными с неблагоприятным сочетанием и наложением друг на друга различных факторов риска.

В страховом деле аналог – несчастные случаи со здоровыми людьми.

В этой области очень хорошо действуют статистические законы отказов. Для большинства изделий, область нормальной эксплуатации характеризуется постоянством параметров интенсивности отказов (λ_n , ω_n). Задача инженера максимально расширить область (2) по координатам наработки.

- **третья область** с возрастанием интенсивности отказов называется областью старения (область катастрофических отказов). Здесь возрастание параметров λ или ω вызывается естественными процессами накопления дефектов. Например: износ поверхностей, коррозия рабочих поверхностей, появление и развитие усталостных трещин и т.п.

Задачи инженера максимально точно предсказать наступление третьего этапа жизненного цикла изделия. В идеале целесообразно устанавливать срок службы в районе границы τ_2 .

Для ремонтируемых изделий существует следующая динамика жизненных циклов (рис. 1.4):

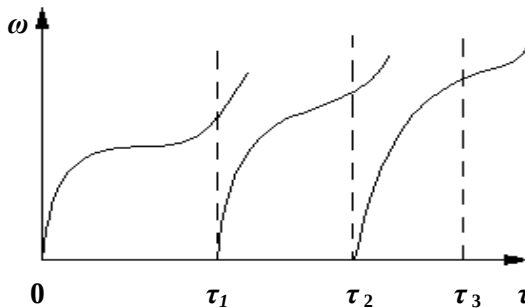


Рис. 1.4. Зависимости потока отказов от времени

Как следует из рис. 1.4. по мере проведения капитальных ремонтов сроки службы (наработка) уменьшаются $(0 - \tau_1) > (\tau_1 - \tau_2) > (\tau_2 - \tau_3)$, при этом параметры отказов, как правило, увеличиваются.

1.2. Структурные схемы надежности

Надежность системы состоящей из нескольких элементов можно повысить двумя путями:

а) через повышение индивидуальных параметров надежности (более прочный материал, увеличенное рабочее сечение, улучшенный уход при эксплуатации и т.п.);

б) через совершенствование конструкций схемы за счет резервирования и дублирования малонадежных элементов.

Дублирование – есть полное или 100%-е резервирование элементов.

Любую реальную схему соединения аппаратов можно представить в виде трех вариантов:

- а) последовательное соединение;
- б) параллельное соединение;
- в) смешанное (комбинированное) соединение, когда суммарная вероятность безотказной работы рассчитывается как сумма вариантов а) и б).

При последовательном соединении элементов – суммарная безотказность равняется произведению ВБР соединенных элементов в заданный момент времени:

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^k P_i, \quad \text{при } \tau = \text{const.}$$

Следствие: общая ВБР при последовательном соединении всегда меньше $P_i^{\min}$, т.е. меньше ВБР самого ненадежного элемента:

$$\boxed{P_{\Sigma} < P_i^{\min}}$$

При параллельном соединении элементов вероятность отказов Q_{Σ} равна произведению вероятности отказов этих же элементов

$$Q_{\Sigma} = \prod_{i=1}^k Q_i, \quad \text{или}$$

$$P_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_i)$$

Если $P_i = \text{const}$, $P = 1 - (1 - P_i)^k$,
где k – количество дублированных элементов.

Следствие: общая ВБР при параллельном соединении элементов всегда больше ВБР самого надежного дублирующего элемента:

$$\boxed{P_{\Sigma} > P_i^{\max}}$$

При параллельном соединении нескольких элементов надежность обязательно возрастает, особенно при переходе от схемы с постоянным резервированием к схеме с отключенным резервом при наличии абсолютно надежных переключателей. В этом случае:

$$P_{\Sigma} = 1 - \frac{\prod_{i=1}^k (1 - P_i)}{k!}$$

Накопители (НАК) в технологических линиях повышают надежность системы P_{Σ} до уровня надежности звеньев между накопителями.

Выводы:

1) Поэлементное включение резерва обеспечивает большую суммарную надежность по сравнению с общим включением.

2) Резервирование с замещением (при абсолютно надежном включателе) эффективнее, чем схема с постоянным включением резерва.

В подтверждение рассмотрим сравнительную эффективность различных вариантов резервирования элементов с одинаковой вероятностью безотказной работы $P_i = 0,9$:

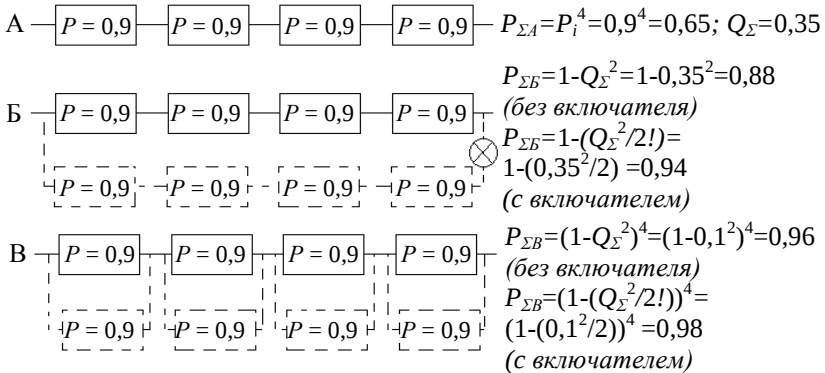
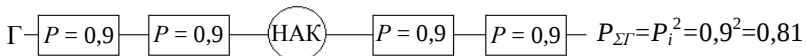


Схема с накопителем



1.3. Порядок нормирования уровня надежности сложных систем

При проектировании машин и аппаратов нормы надежности задают от общего к частному по схеме:

машина — агрегат — узел — деталь.

$$P_i = \sqrt[n]{P_{\Sigma}},$$

где P_{Σ} — вероятность безотказной работы всего узла; P_i — вероятность безотказной работы детали; n — количество деталей в узле.

Допустимое количество отказов в регламентируемый срок службы изделия задается для изделия в целом, а затем распределяется по агрегатам, узлам и деталям, при этом формируются конструктивные требования показателям качества и надежности всех элементов системы.

Но мероприятия по техническому увеличению надежности производят в обратном порядке: деталь – узел – агрегат – машина.

При проектировании ВБР системы, учитывают фактор значимости надежности, связанный с последствием перехода системы, узла или детали в предельное состояние.

Особенно это касается деталей, которые по значимости делятся на 6 групп:

- 1) деталь, отказ которой приводит к нарушению безопасности;
- 2) деталь, отказ которой приводит к предельному состоянию всего изделия;
- 3) деталь, отказ которой требует разборки всего агрегата;
- 4) малоответственные детали (не приводящие к отказу всего агрегата);
- 5) наружные, легко сменяемые;
- 6) детали с завышенным ресурсом работы (большим, чем срок службы агрегата в целом).

1.4. Законы отказов

В процессе эксплуатации объект может находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии. Время пребывания объекта в этих состояниях является непрерывной случайной величиной.

Универсальной вероятностной характеристикой случайной величины является закон ее распределения.

Для установления вида закона распределения необходимо произвести испытания статистически значимого количества объектов на отказы, в интересующих нас условиях эксплуатации.

1.4.1. Экспоненциальный закон распределения отказов

$$P(\tau) = e^{-\int_0^{\tau} \lambda_{\tau} d\tau}$$

Экспоненциальный закон распределения отказов характеризует внезапные отказы в период нормальной эксплуатации изделия:

$$\lambda_{\tau} \approx \text{const}$$

При этом основное уравнение надёжности максимально упрощается:

$$P(\tau) = e^{-\lambda \tau}$$

Удобство экспоненциального закона распределения отказов заключается в следующих факторах:

1) Интенсивность отказов является единственным параметром распределения.

2) Распределение отказов по экспоненциальному закону не зависит от предыдущей наработки изделия до тех пор пока $\lambda_\tau \approx const$.

3) Для ремонтируемых изделий независимо от вида функции плотности отказов f_τ , параметр потока отказов ω_τ при $\tau \rightarrow \infty$, $\omega_\tau \rightarrow 1/T_{cp}$, т.е. для ремонтируемых изделий при длительной эксплуатации объекта, практически всегда действует экспоненциальный закон распределения отказов, т.е. интенсивность отказов практически постоянна.

В рамках этого закона можно записать следующее соотношение для оценки среднего ресурса:

$$T = 1/\lambda$$

Пример: Пусть интенсивность отказов $\lambda_\tau = 10^{-4}$ час⁻¹ и период эксплуатации 1000 часов. Определим вероятность безотказной работы в первые 10 часов и в последние 10 часов.

$$1) P_{(0-10)} = e^{-0,0001 \cdot 10} = 0,999 = 99,9\%$$

$$P_{(990-1000)} = e^{-0,0001 \cdot 10} = 99,9\%$$

Т.е. надежность работы в период $\tau = 0-1000$ часов одинакова для равных временных интервалов.

$$2) P_{(0-1000)} = e^{-0,0001 \cdot 1000} = 90,5\%$$

Т.е. заданный ресурс $T = 1000$ часов прогнозирует наработку с надежностью около 90 %, но если изделие уже отработало 990 часов, то последние 10 часов работы оно будет иметь надежность 99,9 %.

Как правило, в технике выполняется условие $\lambda\tau \leq 0,1$. В этом случае выражение для ВБР можно разложить в ряд:

$$P_\tau = 1 - \lambda\tau + \frac{(\lambda\tau)^2}{2!} - \frac{(\lambda\tau)^3}{3!} + \dots + \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \approx 1 - \lambda\tau$$

Результаты приведены в таблице 1.1.:

Таблица 1.1. Зависимость ВБР от времени эксплуатации

$\lambda\tau = \frac{\tau}{T}$	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
P_τ	0,368	0,9	0,99	0,999	0,9999

Из таблицы следует:

1) при $\frac{\tau}{T} = 1$ 63% отказов возникают за время эксплуатации, равному среднему сроку службы и вероятность того, что изделия будут

работать - 37%, т.е. при эксплуатации изделия в течение среднего срока службы уровень надежности не превышает 37%.

2) Для обеспечения требуемой ВБР до 99% можно использовать только малую долю среднего срока службы 0,1T или 0,01T.

Графически экспоненциальный закон отказов может быть выражен следующим образом (рис. 1.5):

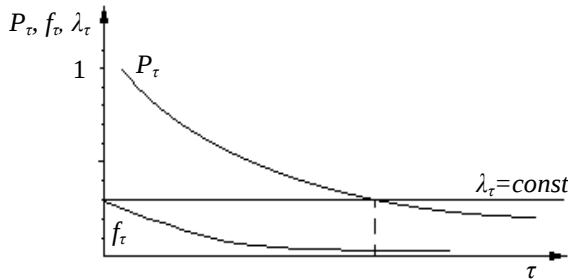


Рис. 1.5. Графическое выражение экспоненциального закона отказов

Экспоненциальный закон распределения дает простые формулы для расчетов в период нормальной эксплуатации ($\lambda = \omega = \text{const}$) следующих важных параметров:

а) число изделий, которое необходимо иметь в запасе при времени эксплуатации τ :

$$n(\tau) = N_o \lambda \tau;$$

б) количество работоспособных изделий после заданного времени τ :

$$N_\tau = N_o (1 - \lambda \tau).$$

1.4.1.1. Расчет надежности и среднего срока службы при последовательном и параллельном соединении элементов

В рамках действия экспоненциального закона можно предложить удобные инженерные зависимости для расчета параметров сложных систем.

а) Последовательное (основное) соединение элементов.

$$P_z(\tau) = \prod_{i=1}^k P_i(\tau) = e^{-\lambda_1 \tau} \cdot e^{-\lambda_2 \tau} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_k \tau} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k) \tau} = e^{-\lambda_z \tau}$$

Суммарное время работы: $T_{\Sigma} = 1 / \lambda_{\Sigma}$

б) Параллельное соединение двух элементов.

$$P_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^k Q_i = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 \tau})(1 - e^{-\lambda_2 \tau}) = e^{-\lambda_1 \tau} + e^{-\lambda_2 \tau} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau}$$

Для нахождения суммарного времени работы 2-х параллельно соединенных элементов используем общую формулу, связывающую ВБР со сроком службы:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P_{\Sigma}(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 \tau} d\tau + \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 \tau} d\tau - \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau} d\tau = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2)}$$

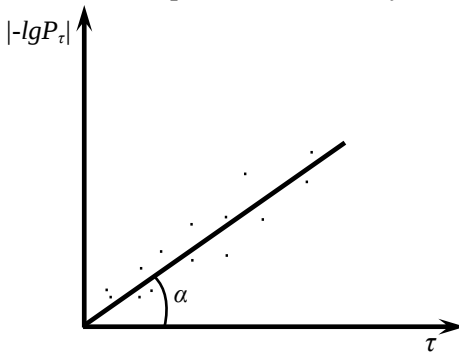
Для наиболее распространенного случая дублирования элементов, когда

$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_k$ полученное выражение для T_{cp} запишется в виде:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \dots + \frac{1}{k\lambda}$$

1.4.1.2. Графический метод определения интенсивности отказов при экспоненциальном законе

Определение интенсивности отказов графическим методом при экспоненциальном законе производится следующим образом (рис. 1.6):



$$\begin{aligned} P_{\tau} &= e^{-\lambda \tau} \\ \lg P_{\tau} &= -\lambda \tau \lg e = \\ &= -0,4343 \lambda \tau \\ \operatorname{tg} \alpha &= 0,43 \lambda \\ \lambda &= 2,3 \operatorname{tg} \alpha \end{aligned}$$

Рис. 1.6. Графический метод определения интенсивности отказов

Знак «-» принимается потому, что ВБР всегда меньше 1, а логарифм числа меньше 1 – отрицательная величина.

1.4.2. Нормальный закон распределения отказов

Для отказов, связанных со старением изделия (третья область эксплуатации) характерно изменение интенсивности отказов во времени, т.е. $\lambda\tau \neq \text{const}$.

Принято градацию законов распределения отказов проводить по частоте отказов f_τ (рис. 1.7).

В координатах $f_\tau - \tau$ величина C характеризует сдвиг распределения, а величина E его размах.

T_{cp} – средний (модальный) ресурс службы, он отражает максимальную частоту или вероятность в данном распределении.

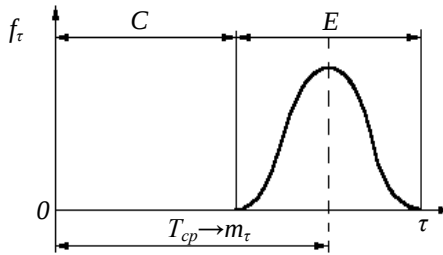


Рис. 1.7. Зависимость частоты отказов от времени

Данный закон распределения относится к классу нормального распределения отказов и математически записывается следующим образом:

$$f_\tau = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\tau-m_\tau)^2}{2S^2}}$$

$$P_\tau = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_\tau^{m_\tau} e^{\frac{-(\tau-m_\tau)^2}{2S^2}} d\tau$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N_0 - 1} \sum (\tau - m_\tau)^2}$$

где m_τ – математическое ожидание среднего срока службы; S – среднеквадратичное отклонение.

Величина S показывает, какая ошибка в среднем допускается, если использовать вместо генерального математического ожидания его выборочную оценку.

$$m_\tau = T_{cp} \pm S$$

Графически нормальный закон отказов может быть выражен следующим образом (рис. 1.8):

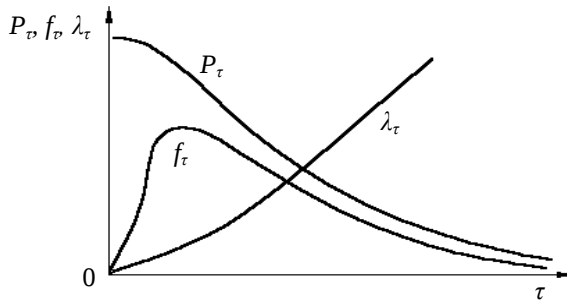


Рис. 1.8. Графическое выражение нормального закона отказов

По широте применения в инженерных расчетах надежности нормальное распределение следует за экспоненциальным.

Для нормального распределения, все зависимости в справочниках по надежности составлены для централизованных координат в симметричной форме, при этом используют квантиль распределения:

$$U_p = \frac{(\tau - m_\tau)}{S} \approx \frac{(\tau - T_{cp})}{S}$$

Квантиль распределения облегчает задачу расчета показателей надёжности.

Для решения прямой задачи – определение вероятности безотказной работы и обратной задачи – определение наработки на отказ (срока службы) при заданной вероятности безотказной работы, могут быть использованы статистические таблицы (например, Приложение 1).

Пример: Оценим ВБР подвижного соединения в течение $\tau = 1,5 \cdot 10^4$ часов, если ресурс подчиняется нормальному закону с параметрами $m_\tau = 4 \cdot 10^4$ часов, $S = 10^4$ часов.

1) Определим квантиль:

$$U_p = \frac{(\tau - m_\tau)}{S} = \frac{(1,5 - 4) \cdot 10^4}{10^4} = -2,5$$

и по Приложению 1 найдем ВБР = 0,9938.

Пример обратной задачи:

Оценим 80%-й ресурс ($P_\tau = 0,8$) гусеницы трактора, если известно что ее долговечность подчинена нормальному распределению с параметрами: $m_\tau = 10^4$ часов, $S = 6 \cdot 10^3$ часов. Найти срок службы.

1) по заданному P_τ найдем квантиль $U_p = -0,842$, и рассчитаем ресурс:

$$\tau = 10^4 + (-0,842)6 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^3 \text{ часов.}$$

Иногда вместо среднеквадратичного отклонения используется параметр дисперсии: $D = S^2$.

1.4.3. Закон распределения отказов Вейбулла

В общем случае нормальные и усталостные отказы, описываемые экспоненциальным и нормальным распределением, могут быть обобщены распределением Вейбулла.

Распределение Вейбулла, как и нормальное распределение, определяется двумя независимыми параметрами:

параметр формы $m > 0$ и параметр масштаба $\tau_o > 0$.

Основные характеристики распределения запишутся как:

$$f_\tau = \frac{m}{\tau_o} \tau^{(m-1)} e^{\frac{-\tau^m}{\tau_o}}$$

$$P_\tau = e^{\frac{-\tau^m}{\tau_o}},$$

$$\lambda_\tau = \frac{m}{\tau_o} \tau^{(m-1)}.$$

При ряде конкретных значений определяющих параметров распределения (m и τ_o) распределение Вейбулла переходит в частные случаи: экспоненциальное, нормальное, распределение Рэлея и др.

Выделим три зоны существования распределения Вейбулла (рис. 1.9):

$$m < 1, m = 1, m > 1.$$

При $m < 1$ – интенсивность отказов резко убывает.

При $m = 1$, $\lambda_\tau = 1/\tau_o$, т.е. распределение Вейбулла переходит в экспоненциальный закон отказов ($\lambda_\tau = \text{const}$), а параметр τ_o эквивалентно отражает ресурс работы изделия ($\tau_o = T_{\text{ср}}$) при этом f_τ – функция убывающая.

При $m > 1$ интенсивность отказов резко возрастает:

а) при $m < 2$ – выпуклостью вверх;

б) при $m > 2$ – выпуклостью вниз;

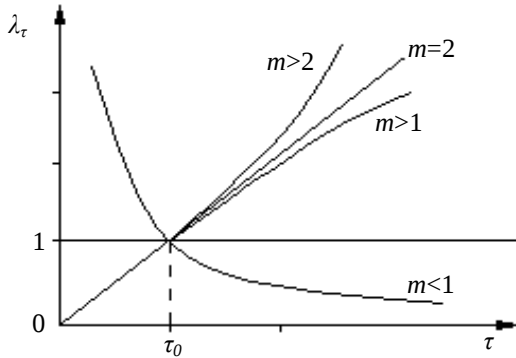


Рис. 1.9. Графическое выражение закона отказов Вейбулла

в) при $m = 2$ — интенсивность отказов линейно растет со временем ($\lambda = m\tau$) — этот частный случай распределения Вейбулла называется распределение Рэля.

Распределение Вейбулла, как наиболее универсальное, подходит для описания практически всех случаев отказов оборудования.

Распределение Вейбулла не целесообразно применять, когда при переходе от нормальной эксплуатации изделия в зону усталостного разрушения интенсивность отказов возрастает скачком.

1.5. Временные характеристики надежности

Возможны два варианта определения временных показателей:

1) Оценивается календарная продолжительность эксплуатации изделия от момента начала эксплуатации до возникновения предельного состояния, определенного технической документацией.

Срок службы исчисляют:

- а) от момента производства;
- б) от начала эксплуатации;
- в) от последнего капитального ремонта.

Различают срок службы:

- а) до первого капитального ремонта;
- б) до наступления морального износа;
- в) до списания объекта.

2) Оценивается фактическая наработка объекта изделия до отказа (час, км, м³, и т.д.).

Наработка объекта от определенного времени до наступления предельного состояния называется ресурсом (T_p).

Различают следующие виды ресурсов:

- ресурс до первого капремонта;
- ресурс межремонтный;
- назначенный ресурс;
- гамма - процентный ресурс (T_γ).

Назначенный ресурс (R) – суммарная наработка, при достижении которой изделие снимается с эксплуатации независимо от его технического состояния.

Назначенный ресурс определяется из соображений безопасности и экономичности.

Как правило, $R < T_{cp}$

где T_{cp} – наработка:

- а) до отказа (для невосстанавливаемых изделий);
- б) на отказ (для восстанавливаемых изделий).

Гамма - процентный ресурс

Если $T_{90} = 2000$ часов, это означает что 90% изделий гарантировано, проработают более 2000 часов.

Фактически мы заменяем ВБР за время τ на гарантированную безотказность.

$$\begin{aligned} \text{ВБР}(\tau) &\rightarrow \gamma [\%] \\ 0,9 &\rightarrow 90\% \end{aligned}$$

Метод определения гамма - процентного ресурса.

Допустим, необходимо определить 90%-й ресурс ВБР для 50 канатов.

В процессе испытания первые 5 канатов показали следующее время наработки до отказа: 132ч, 141ч, 158ч, 160ч, 161ч, 168ч, 171ч...

Для указанной группы изделий $T_{90} = 161$ ч., т.к. 90% ресурсу соответствует время работы после обрыва 10% канатов, поставленных на испытание (10% от 50 = 5 канатам).

Комплексные показатели надежности:

1. Коэффициент технического использования:

$$K_{ти} = \frac{T_{раб}}{T_{раб} + T_{ост} + T_{рем}}$$

где $T_{раб}$ – время нормального функционирования объекта; $T_{раб} + T_{ост} + T_{рем}$ – полное время эксплуатации объекта, включая время технических остановов и обслуживания.

$K_{ти}$ характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии и изменяется от 0 до 1.

$K_{ти}$ численно равен вероятности того, что объект в данное время работает, а не простаивает.

2. Коэффициент готовности (K_r):

$$K_r = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}}}$$

K_r отражает долю времени технического обслуживания без плановых остановок.

3. Коэффициент оперативной готовности ($K_{ог}$)

$$K_{ог} = K_r P_t$$

$K_{ог}$ – характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени (запорная арматура, предохранительные клапаны и т.д.).

Для сложных систем комплексные показатели надежности при нормальном соединении перемножаются.

Правила аналогичны для последовательного и параллельного соединения.

Коэффициенты, характеризующие работу оборудования:

1. Коэффициент экстенсивности:

$$K_э = \frac{\tau_{\text{факт}}}{\tau_{\text{проект}}};$$

2. Коэффициент интенсивности:

$$K_и = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{проект}}},$$

где Q – производительность аппарата;

3. Коэффициент использования аппарата:

$$K = K_э K_{и}.$$

Параметром совершенствования любого аппарата будет приближение указанных коэффициентов к 1.

Выбор характерных показателей надежности.

Как правило, надежность комплексно характеризуется максимально двумя показателями надежности.

Примеры показателей характеризующих безотказную работу:

а) электрическая лампа – основной показатель – $T_{ср}$, вспомогательный – T_{γ} .

б) трос лифта – основной показатель – вероятность отказа, вспомогательный – ресурс T_p .

в) центрифуга периодического действия – основной показатель – K_r , вспомогательный – ресурс T_p .

г) предохранительный клапан – основной показатель – $K_{ог}$, вспомогательный – T_p .

1.6. Классификация изделий химического машиностроения по надежности

Рассмотрим классификацию объектов химического машиностроения. Номенклатура показателей надежности для этих объектов выбирается в зависимости от следующих критериев: класс объекта (изделия) (табл. 1.2); временной режим эксплуатации (табл. 1.3); последствия отказа (группа надежности) (табл. 1.4); принцип ограничения длительности использования (табл. 1.5) [1]:

Таблица 1.2. Класс объекта

Класс объекта		Примеры объектов
Код	Характеристика	
1	Не восстанавливаемые объекты общего назначения (предназначенные для использования в качестве элементов в объектах разных видов серийного производства)	Подшипник качения, конденсатор, резистор, отрезок кабеля
2	Невосстанавливаемые, не ремонтируемые или подвергаемые обезличенному (нерегламентируемому) ремонту определенного вида объекты самостоятельного и целевого назначения или предназначенные для использования в качестве элементов в объекте определенного вида	Прибор, скважинный насос, колесная пара железнодорожного вагона, объекты бытовой техники
3	Восстанавливаемые объекты	Автомобиль, станок, гидротурбина, телевизор

Таблица 1.3. Временной режим эксплуатации

Режим эксплуатации		Пример объектов
Название режима	Характеристика	
Непрерывный	Период действия длится непрерывно	Нефтескважинное оборудование, турбогенератор крупной электростанции, барограф
Циклический	Определенные периоды действия и простоя чередуются с постоянной цикличностью	Городской транспорт (суточный цикл), сельскохозяйственный комбайн (сезонный цикл), мартеновское оборудование (технологический цикл)
Оперативный	Неопределенный период простоя сменяется периодом действия заданной продолжительности	Противопожарное оборудование, судовой водоотливной насос, метеорологическая ракета
Общий	Периоды действия и простоя чередуются случайным образом. Закономерность чередования не может быть установлена либо по условиям эксплуатации, либо потому, что условия эксплуатации различаются для разных экземпляров объектов одного вида	Гидротурбины электростанций, двигатели общего назначения, автомобили, торговые автоматы, бытовая техника

Таблица 1.4. Группа надежности

Группа надежности	Последствия отказа	Пример изделия
I	Угроза безопасности людей, значительный материальный ущерб	Агрегат большой единичной мощности, самолет, турбогенератор
II	Материальный ущерб от отказа одного порядка со стоимостью изделия	Машина или аппарат в технологической линии ограниченной мощности
III	Материальный ущерб связан с утратой изделия или с его восстановлением	Насос, прибор, бытовая техника, электроосветительная аппаратура

Таблица 1.5. Принцип ограничения длительности использования

Принцип ограничения длительно- сти использования		Изделия, для ко- торых выбирается данный принцип ограничения	Примеры
Название принципа	Определение		
Ограничение по назначению	Использование изделия прекраща- ется при опреде- ленной наработке или по истечении определенного срока или по окон- чании выполнения задачи	Изделия I и II групп надежности, оценка тех- нического состо- яния которых при эксплуатации невозможна или результаты оцен- ки не влияют на сроки прекра- щения использо- вания	Профилактическая замена элементов в крупных агрега- тах и системах при плановом тех- ническом обслу- живании
Вынуж- денное ог- раничение	Использование изделия прекраща- ется: а) из-за отказа изделия; б) по оценке тех- нического состоя- ния (скоро насту- пит отказ или пре- дельное состояние либо изделие не выполнит оп- ределенной зада- чи)	Все изделия III группы надежно- сти. Изделия I и II групп на- дежности, когда по оценке техни- ческого состояния можно опреде- лить сроки пре- ращения исполь- зования	Замена перего- ревшей электри- ческой лампочки; снятие автопокры- шек с изношен- ным протектором; замена тормозных колодок, изно- шенных до допус- тимого предела; остановка цеха- автомата произ- водства подшип- ников при увели- чении доли брака; при контрольных испытаниях

Для организации обратной связи между стадиями эксплуатации и ремонта должна быть организована работа по сбору и обработке информации о надежности изделий. Организацию и координацию работ по отработке на надежность вновь проектируемых изделий и повыше-
нию надежности серийно изготавливаемых изделий должна осуществ-
лять служба надежности, создаваемая на промышленных предприятиях
(объединениях), а также в конструкторско-технологических и отрасле-
вых научно-исследовательских институтах [4].

1.7. Сбор исходных данных для определения параметров

надежности

Сбор данных по надежности осуществляется следующими субъектами:

- а) проектными организациями – для усовершенствования конструкции изделия;
- б) изготовителями – для снижения числа рекламаций и усовершенствования технологий изготовления, сборки и контроля изделий;
- в) ремонтными организациями – для планирования трудоемкости ремонтных работ, количества запчастей и снижения времени простоев;
- г) потребителями – для усовершенствования порядка эксплуатации.

Источниками информации по надежности служат: ремонтные журналы, дефектные ведомости, номенклатура и количество запчастей, выписываемых со склада технологическими подразделениями и наблюдения специалистов обслуживающего персонала.

Кроме пассивного сбора данных на основе анализа отказов в нормальных эксплуатационных условиях проводятся специальные стендовые испытания на отказ партии однородных изделий.

Особую группу испытаний представляют форсированные испытания, которые позволяют экономить время, при некотором снижении достоверности полученных результатов.

1.8. Форсированные испытания на надежность

Форсированные испытания проводятся с целью экономии ресурсов, времени и количества разрушаемых объектов.

Такие испытания возможны в зоне без скачкового изменения параметров процесса. Например, при введении смазки в узел сухого трения сила трения и интенсивность износа изменяется скачком. Аналогично при изменении химического состава коррозионной среды и качества взаимодействия поверхностей.

Мы рассмотрим 3 метода экономного проведения испытаний:

- а) сокращение времени испытаний за счет интенсификации процесса и ужесточения параметров;
- б) сокращение количества испытываемых объектов, при отсутствии отказов за контрольное время, равное требуемому ресурсу;
- в) сокращение количества испытываемых объектов, за счет увеличения продолжительности испытания.

1.8.1. Сокращение времени испытаний за счет интенсификации процесса

Надежность механических изделий при наработке на отказ зависит от:

- напряжения или удельного давления;
- температуры;
- частоты изменения рабочих параметров и т.п.

При назначении параметров форсирования необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) фактор масштабирования;
- 2) степень сохранения параметров стабилизации (химический состав материала, условия смазки и т.п.)
- 3) выделение управляющих и результирующих параметров процесса при его интенсификации.

Пример масштабирования геометрических размеров: при увеличении диаметра трубопровода в 2 раза, его сечение увеличится в 4 раза, а боковая поверхность только в 2 раза. В этой связи нецелесообразно принимать параметр масштабирования или интенсификации более десяти крат.

Стабилизация параметров испытаний подразумевает поддержание на заданном уровне всех контролируемых параметров, кроме выбранных для форсирования.

В качестве параметров форсирования выбираются легко регулируемые характеристики.

Параметром форсирования процесса служит **коэффициент ускорения** – отношение времени наработки в номинальном τ и форсированных режимах τ_ϕ .

$$K_y = \frac{\tau}{\tau_\phi}$$

При форсировании испытаний за счет изменения величины напряжения в изделии при стабилизации остальных параметров имеют место следующие зависимости:

$$\sigma^m \tau = \sigma_\phi^m \tau_\phi = \text{const}$$

$$K_y = \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma} \right)^m$$

Величина показателя степени m зависит от вида механического или усталостного изнашивания.

Например:

- $m = 6$ – при изгибе улучшенных и нормализованных сталей;
 $m = 9-12$ – при изгибе закаленных сталей;
 $m = 6$ – при изнашивании с начальным контактированием по линии;
 $m = 1-2$ – при изнашивании в условиях скудной смазки;
 $m = 3$ – при изнашивании с постоянной смазкой.

Аналогично можно интенсифицировать процессы через изменение температуры.

а) для электрической изоляции существует правило 10°C , при повышении температуры испытания на 10°C ресурс τ сокращается вдвое, аналогично для органической смазки.

Для неорганической смазки, двойное сокращение ресурса требует увеличения температуры на $12 - 20^\circ\text{C}$.

При форсировании испытаний за счет изменения температуры в изделии при стабилизации остальных параметров можно записать:

$$K_y = \left(\frac{t_\phi}{t} \right)^m$$

Кроме изменения уровня напряжений и температуры для ускорения испытаний могут быть использованы следующие факторы: увеличение времени испытаний, увеличение скорости относительного скольжения и т.д.

При изменении двух параметров и более общий коэффициент ускорения определяется как произведение:

$$K_y^\Sigma = K_y^P K_y^\tau K_y^V$$

1.8.2. Сокращение количества испытываемых объектов, при отсутствии отказов

Если испытания прекращать до наступления разрушения, то можно уменьшить количество испытываемых объектов за счет снижения доверительной вероятности полученных результатов.

Доверительной вероятностью β называется вероятность того, что истинное значение оцениваемого параметра лежит в заданном интервале, ограниченном с двух сторон:

$$\text{Вер} (P_n \leq P_\tau^* \leq P_e) = \beta$$

где P_n и P_e – нижний и верхний пределы ВБР.

В практике наибольший интерес представляет односторонняя вероятность (α), которая значит, что полученная расчетная вероятность больше нижнего предела:

$$\text{Вер}(P_n \leq P_\tau^*) = \alpha$$

При большом числе испытаний расчетная вероятность стремится к истинной.

$$P_\tau^* \rightarrow \text{ВБР}$$

Для подтверждения заранее выбранного нижнего предела ВБР (P_n) необходимо произвести испытания с доверительной вероятностью (α) следующего количества изделий:

$$N^* = \frac{\lg(1-\alpha)}{\lg P_n}$$

Эта зависимость справедлива для случая, когда за период испытаний отказов практически не наблюдалось.

Пример: определить число изделий для минимального количества испытаний с достоверностью $\alpha = 0,9$ для $P_n = 0,9$.

$$N^* = \frac{\lg(1-0,9)}{\lg 0,9} = 22$$

Таким образом, при безотказной работе 22 изделий за время испытаний, ВБР подтверждается с достоверностью 0,9.

1.8.3. Сокращение количества испытываемых объектов, за счет увеличения продолжительности испытания

Связь между количеством объектов поставленных на испытание и временем испытания может быть представлена в следующем виде:

$$N_0 \cdot \tau = \text{const}$$

Следовательно, для соблюдения const число испытываемых объектов может быть снижено за счет увеличения времени в равной пропорции:

$$\downarrow N_0 \cdot \uparrow \tau = \text{const.}$$

2. Физика отказов

Физика отказов рассматривает явления, приводящие к отказам на трех уровнях:

- субмикроскопическом;
- микроскопическом;
- макроскопическом.

Субмикроскопический уровень изучает строение материалов на уровне от молекулярного до кристаллического, соответственно для аморфных и кристаллических материалов. Этот уровень изучения служит в основном базой для объяснения закономерности поведения материалов. Для механиков существенно в этом плане рассмотрение процессов кристаллизации, взаимодействия кристаллов, образования движения дислокаций, а также диффузия компонентов вглубь материалов.

Микроскопический уровень требует изучения материалов в микрообласти, предполагая, что аналогичные свойства могут быть в дальнейшем распространены на весь объем материала. Этому уровню изучения соответствует представление об идеально однородном теле. Примером такого изучения могут служить законы, устанавливающие связь между силами деформации, напряжениями и деформациями в упругой области.

Макроскопический уровень рассматривает изменение свойств и состояний материала всего тела детали. При этом закономерности, полученные на микроскопическом уровне, переносятся на макрообъект через теоретические или экспериментальные инженерные зависимости.

2.1. Обратимые и необратимые процессы

Типичными примерами обратимых процессов являются закон Гука, закон теплового расширения и т.п.

В качестве примера обратимого процесса рассмотрим стержень, находящийся под действием механического F и теплового Q нагружения (рис. 2.1).

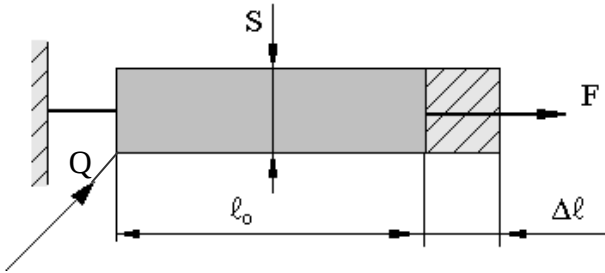


Рис. 2.1. Пример обратимого процесса

Зависимость, отражающая изменение линейного размера (ℓ_0) упругого стержня сечением S , под действием растягивающей силы F и теплового источника Q , дающего повышение температуры Δt имеет вид:

$$\Delta \ell = \frac{F \ell_0}{ES} + \ell_0 \beta \Delta t$$

При снятии внешних нагрузок стержень возвращается в исходное состояние ($\Delta \ell = 0$).

Указанная закономерность существует, если $\Delta \ell$ не превышает $\Delta \ell_{\max}$, что отражает переход от упругой к пластической деформации.

В противовес обратимым процессам, которые не изменяют начального состояния объектов, а только модифицируют его, необратимые процессы (процессы старения) приводят к патологическому изменению состояния объекта. Именно необратимые процессы наиболее существенно влияют на надежность изделия.

Рассмотрим более подробно необратимые процессы старения материалов и деталей. По структуре закономерностей старения они могут быть разделены на 2 группы:

- а) законы превращений (могут быть записаны без временного параметра);
- б) основные законы старения (параметр времени играет существенную роль).

Типичным примером законов превращения могут служить закономерности коррозии, которые связывают трансформацию материала (в процессе взаимодействия со средой), с концентрацией, электрохимическими потенциалами и химическими свойствами среды.

Типичными законами старения являются закономерности изнашивания материала, эрозионного разрушения поверхностей, развития усталостных трещин и т.п.

Необратимые процессы приводят к существенному и прогрессирующему изменению характеристик изделия, понижающих показатели надежности, как конкретного объекта, так и системы в целом.

При изучении процесса старения мы можем их разделить по скорости накопления дефектов на 3 группы:

- быстропротекающие;
- процессы средней скорости;
- медленные процессы.

1) Быстропротекающие процессы имеют характерные времена (или периодичность изменения), измеряемую секундами или долями секунд. Эти процессы обычно связаны с циклами работы машин: вибрации, изменение сил трения в подвижных соединениях, пульсации нагрузки и т.п.

2) Процессы средней скорости связаны с длительностью нормальной работы машины в течение смены или в течение изготовления изделия (измеряется в минутах, часах, сутках) типичными примерами является релаксация внутренних напряжений в изделии после изготовления, первичная приработка и т.п.

3) Медленные процессы протекают в период работы изделия между капитальными ремонтами и измерениями в сутках или годах, типичными примерами является износ, коррозия, пластическое деформирование и т.д.

Дефекты, возникающие в результате медленных процессов при одной и той же природе могут быть допустимыми и недопустимыми (т.е. имеющие аварийный характер).

Пример: коррозия трущихся поверхностей в подшипнике – недопустимое повреждение, а коррозия станины станка на такую же глубину – допустимое повреждение.

Примеры процессов старения:

а) Объект: тело детали

Внешние проявления старения:

1. Разрушение: хрупкое и вязкое;
2. Деформация: пластическая или коробление;
3. Изменение свойств материала: механических свойств, структурного и химического состава, физических свойств (газопроницаемость).

б) Объект: поверхность детали или пары деталей.

Внешние проявления разрушения:

1. Разъедание: из-за коррозии, эрозии, кавитации, прогара, трещинообразования.
 2. Нарост по причине: адгезии, адсорбции, нагара, накипи.
 3. Изменение свойств поверхностного слоя: шероховатости, макро- и микротвердости, отражательной способности, знака и величины напряженного состояния.
 4. Изнашивание или истирание, проявление усталостных явлений.
 5. Изменение условий контакта: рост площадок контактирования, распределение смазочного материала и его сплошности.
- Пункты 4 и 5 проявляются наиболее ярко при контактировании двух поверхностей.

2.2. Напряженное состояние поверхностного слоя

В процессе обработки деталей машин (дробеструйная обработка, резание, химикотермическая обработка, нагрев и охлаждение) на поверхности детали возникают остаточные напряжения, которые взаимодействуют с напряжениями, возникающими в процессе последующей обработки или эксплуатации. При этом остаточные напряжения алгебраически складываются с рабочими или внешними напряжениями, усиливая или ослабляя последние.

Остаточные напряжения при наличии поверхностных дефектов (трещины, канавки и т.д.) способствуют развитию «усталостных» процессов.

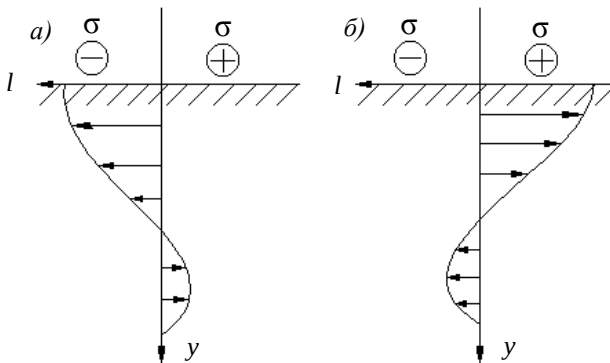


Рис. 2.2. Остаточные напряжения изделий

Рисунок: 2.2. *а)* отражает эпюру остаточных напряжений полученных в процессе пластического деформирования детали (обкатка роликом и т.д.);

2.2. *б)* отражает эпюру остаточных напряжений полученных в процессе нагрева изделия выше температуры ползучести и последующего охлаждения.

Процессы, ведущие к увеличению удельного объема поверхностного слоя (например, пластическое деформирование) вызывает полезное напряжение сжатия ($-\sigma$) (рис. 2.2 *а)*.

Процессы, вызывающие уменьшение удельного объема (например, остывание) вызывают вредные напряжения растяжения ($+\sigma$) (рис. 2.2 *б)*.

Рассмотрим совместное действие разнонаправленных процессов при нанесении на металлическую основу расплавленного металла (например, процесс газотермического напыления). Процесс делится на несколько стадий:

во-первых: подготовка поверхности основы:

а) очистка поверхности от окислов;

б) создание необходимой шероховатости (R_z);

в) создание напряжения сжатия на поверхности;

В технике все эти три стадии могут быть совмещены в одной операции (дробеструйная или пескоструйная обработка поверхности).

Стадию дробеструйной обработки отразим на рис. 2.3 *а)*, процесс нанесения покрытия – на рис. 2.3 *б)*.

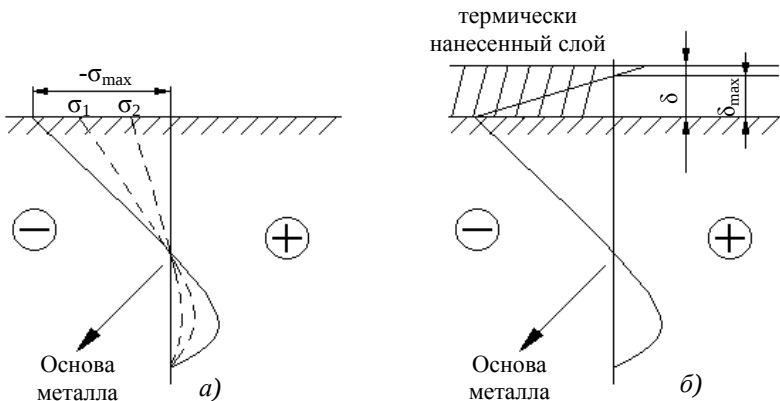


Рис. 2.3. Процессы подготовки поверхности *а)* и нанесения горячего покрытия *б)*

Полезные напряжения сжатия со временем релаксируют от $-\sigma_{\max}$ (в момент дробеструйной обработки) до σ_1 (через час), σ_2 (через два часа) (рис. 2.3 а).

При нанесении горячего покрытия (рис. 2.3 б) остывание слоя толщиной δ сопровождается развитием в покрытии растягивающих напряжений, которые частично или полностью должны быть компенсированы за счет начального напряжения сжатия основы. Из условия полученного на поверхности нулевого напряжения технолог определяет максимальную толщину наносимого покрытия ($\delta_{\max}$).

2.3. Трибологические отказы. Закономерности изнашивания

Трибологические отказы возникают при непосредственном взаимодействии трущихся поверхностей. Причиной отказов данного типа является износ рабочей поверхности.

Параметрами износа являются: линейный износ U (мкм), скорость изнашивания v (мкм/час), интенсивность изнашивания j .

$$v = dU/d\tau$$

$$j = dU/dS$$

где dS – путь трения.

1. Линейный износ есть изменение размера детали измеренное в направлении перпендикулярно к поверхности трения.

2. Скорость износа есть отношение параметра износа ко времени, за которое этот износ проявился. Под параметрами износа может быть не только изменение линейного размера, но и уменьшение массы за счет изнашивания (весовой износ). Как правило, износ записывается в удельных показателях отнесенных к единичной поверхности износа.

3. Интенсивность износа в безразмерном виде представляет порядок величин от 10^{-14} до 10^{-3} . На практике, как правило, измеряют размерную интенсивность. Законы изнашивания связывают характеристики износа с причинами вызывающими разрушение поверхностей трения.

В общем случае параметры износа зависят:

- от силовых и кинематических факторов. В первую очередь от удельного давления и относительной скорости перемещения контактирующих поверхностей;

- от параметров характеризующих состав, структуру и механические свойства трущихся поверхностей. Например: твердость и модуль упругости;

- от свойств поверхностного слоя, главным образом, величины шероховатости, характера опорной кривой, знака и величины остаточных напряжений;
- от вида трения и смазки (наличие и качество);
- от внешних условий влияющих на процесс износа. В частности, от температуры, от параметров вибрации, от степени сжатия или вакуумирования окружающей атмосферы, от коррозионных свойств среды.

2.4. Основные методы измерения износа

Существуют две группы методов измерения износа: интегральные и локальные.

Интегральные методы измерения износа:

- а) определение износа по изменению массы или объема образца, по изменению средней величины зазора (в нескольких сечениях);
- б) определение продуктов износа в смазке (по железу):
 - 1) химическим методом, через определение количества железа в саже получившейся от сжигания масла;
 - 2) спектральным методом, через определение содержания железа в продуктах сжигания масла. Этот метод требует специальных приборов и квалифицированного персонала;
 - 3) через введение радиоактивных изотопов в поверхностный слой изнашиваемого металла. Точность методов связанных с анализом железа в масле составляет $10^{-6} - 10^{-8}$ г/см³.

Эти методы позволяют определять износ без разборки машин и их узлов.

Локальные методы измерения износа:

- а) метод искусственных баз;
- б) микрометрирование на основе профилографа;
- в) метод локальной поверхностной активации (метод вставок).

Метод искусственных баз реализуется в основном в двух вариантах:

- метод лунок;
- метод отпечатков.

Рассмотрим метод лунок (рис. 2.4). Суть метода заключается в том, что на исследуемой поверхности радиусом r вырезается лунка и по уменьшению ее размеров в процессе эксплуатации судят о величине местного износа.

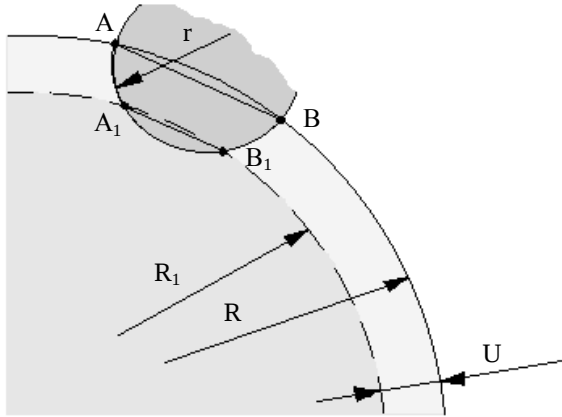


Рис. 2.4. Определение износа методом лунок

Между линейным износом U и размерами хорд AB (до начала износа) и A_1B_1 (по окончании износа) существует следующая связь:

$$U = \frac{1}{8} \left(AB^2 - A_1B_1^2 \right) \left(\frac{1}{r} \pm \frac{1}{R} \right)$$

где R – радиус поверхности износа на которую наносится лунка;
 знак “+” для выпуклой детали;
 знак “-” для вогнутой детали;
 для плоской детали $R = \infty$.

Точность метода лунок находится в пределах $\pm 0,5-2$ мкм.

Рассмотрим метод отпечатков. В этом методе для образования углубления применяют алмазную четырехгранную пирамиду с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями 136° (рис. 2.5) [2]. Такая пирамида применяется в приборах для определения твердости типа Виккерс.

Пирамида вдавливается под нагрузкой P в испытываемую поверхность и измеряется диагональ отпечатка. После износа размер отпечатка уменьшается (d_1) и по разности ($d_0 - d_1$) судят о величине износа $U = h_0 - h_1$. Отпечаток диагонали измеряют при помощи оптического измерительного устройства через микроскоп.

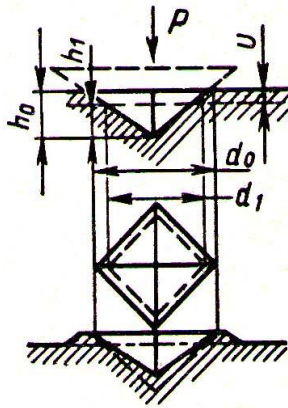


Рис 2.5. Определение износа методом отпечатков

Такой метод имеет ряд недостатков. Во-первых, при вдавливании пирамиды вокруг отпечатка происходит вспучивание материала, в результате чего искажается форма отпечатка. Во-вторых, после снятия нагрузки происходит некоторое восстановление углубления, оно изменяет свою начальную форму.

Если вспучивание можно удалить полированием, то упругого восстановления отпечатка избежать нельзя, и это вносит свои погрешности при измерении износа.

Этот метод неудобен также и тем, что размеры отпечатка малы и для нанесения отпечатка требуются большие усилия.

2.5. Классификация видов изнашивания

Согласно ГОСТ 16429 все виды изнашивания можно разделить на 3 группы: 1) механическое изнашивание; 2) молекулярно-механическое изнашивание; 3) коррозионно-механическое изнашивание. Эти основные виды изнашивания подразделяются на подгруппы (рис. 2.6):



Рис. 2.6. Классификация видов изнашивания

Механическое изнашивание.

Механическое изнашивание происходит в результате только механического взаимодействия шероховатых поверхностей. Оно характерно для стадии приработки трущейся пары, проявляется в виде разрушений поверхности через царапание более мягкого материала абразивными частицами или более твердым материалом. Эффект абразивного изнашивания выражается актом микрорезания, где твердая частица играет роль резца.

Усталостное отслаивание.

При пластическом деформировании поверхностного слоя изменяется его удельный объем, и материал может отделяться в виде чешуек в плоскости параллельной линии скольжения. В технике оба вида механического изнашивания характеризуется сравнительно низкими контактными температурами и разрушением макрообъемов материала.

Молекулярно-механическое изнашивание происходит на границах кристаллов и сопровождается механизмом атомно-молекулярного взаимодействия.

Адгезионное изнашивание происходит через «схватывание» и выражается в «налипании» или микропереносе одного металла на поверхность другого.

Усталостный перенос.

При воздействии периодических или циклических нагрузок происходит многократное взаимодействие контактирующих тел в микрообъемах, что приводит к явлению выкрашивания более слабого материала.

Коррозионно-механическое изнашивание обязательно сопровождается взаимодействием контактирующих поверхностей с кислородом воздуха или с агрессивной средой.

При окислительном изнашивании происходит адсорбция молекул кислорода воздуха на межкристаллических границах имеющих минимальную энергию активации, далее процесс переходит в стадию диссоциации молекул кислорода и образования тонкой пленки окислов. Окисные пленки в начальной стадии играют роль смазки между контактирующими поверхностями, снижая интенсивность изнашивания. Но при увеличении объема материала, задействованные в процессе окисления фрагменты «толстых» окисных пленок (из-за изменения

удельного объема) начинают разрушаться с высокой интенсивностью. Образование пленки окислов в процессе изнашивания благоприятно сказывается на интенсивности износа, т.к. при этом уменьшается фактическое давление шероховатых поверхностей, а тонкие пленки играют роль смазки.

Фреттинг-коррозия возникает при колебательных микроперемещениях двух контактирующих поверхностей при наличии коррозионно-активной среды. Места проявления фреттинг-коррозии:

- прессовые посадки на вращающихся валах;
- в шлицевых и шпоночных соединениях;
- в болтовых соединениях под переменной нагрузкой;
- на контактных поверхностях рессор и т.д.

ГОСТовская классификация видов износа не связывает результирующие параметры изнашивания с характеристиками трущейся пары:

- удельное давление;
- скорость относительного скольжения;
- контактная температура материала и т.д.

В инженерной практике существует множество других классификаций.

Рассмотрим классификацию Б.И. Костецкого, которая подразделяет виды изнашивания на 5 групп:

- 1) Износ от схватывания первого рода;
- 2) Окислительный износ;
- 3) Тепловой износ (схватывание второго рода);
- 4) Абразивный износ;
- 5) Осповидный износ.

Проиллюстрируем взаимосвязь первых трех видов этой классификации через зависимость скорости изнашивания от скорости скольжения (рис. 2.7).

Данная зависимость соответствует конкретной паре материалов, определенной нагрузке и конкретной начальной шероховатости (при прочих равных условиях).

Участок (1) (рис. 2.7) характеризует схватывание первого рода со скоростью изнашивания $10 - 15 \text{ мкм/ч}$. Этот вид износа имеет место:

- при контактном давлении выше предела текучести;
- при скорости скольжения поверхностей $V_1 \leq 1 - 1,5 \text{ м/с}$;
- при температуре контакта не более 100°C .

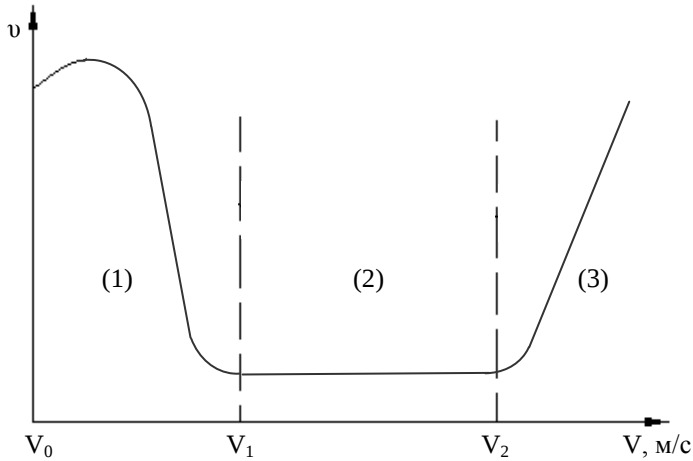


Рис. 2.7. Зависимость скорости изнашивания от скорости скольжения

В этом случае происходит схватывание металлов. Более мягкий металл налипает на более твердый. Локализации процесса способствует уменьшение фактического давления из-за приработки поверхностей и начало образования пленки оксидов из-за повышения температуры в точке контакта.

Участок (2) отражает окислительный износ с минимальной скоростью изнашивания ($0,1 - 0,5 \text{ мкм/ч}$). Снижение скорости изнашивания связано с появлением на контактных поверхностях оксидов железа, играющих роль смазки. Граница зоны окислительного изнашивания лежит в пределах скорости скольжения до 4 м/с при сухом трении, и до 30 м/с при трении со смазкой. При этом контактная температура меняется в пределах $200 - 300^\circ\text{C}$.

Участок (3): при увеличении скорости скольжения поверхностей (V_2) объем тепловыделения увеличивается и их температура становится более 300°C , износ переходит в тепловой и скорость изнашивания достигает $5-15 \text{ мкм/час}$.

Это существенно ускоряет:

- диффузию кислорода в объем материала (по границе кристалла);
- скорость реакции окисления металла.

Вершины неровностей практически сплавляются с односторонним переносом металла (так называемое схватывание второго рода). Для уменьшения износа трущихся поверхностей на основе классификации Костецкого необходимо применять методы, расширяющие границы второго участка, особенно в сторону больших скоростей.

2.6. Параметры, влияющие на интенсивность изнашивания

2.6.1. Влияние скорости скольжения трущихся поверхностей на интенсивность изнашивания

Для каждой пары материалов при фиксированном уровне контактного давления существует критическая скорость, при повышении которой, интенсивность изнашивания меняется в десятки или в сотни раз (рис. 2.8).

При скорости скольжения выше $\approx 0,15$ м/с интенсивность изнашивания стали У8 значительно падает. Таким образом, данную сталь целесообразно эксплуатировать при скорости скольжения выше 0,15 м/с. Для закаленной стали У10 скорость скольжения не должна превышать величины $\approx 0,8$ м/с.

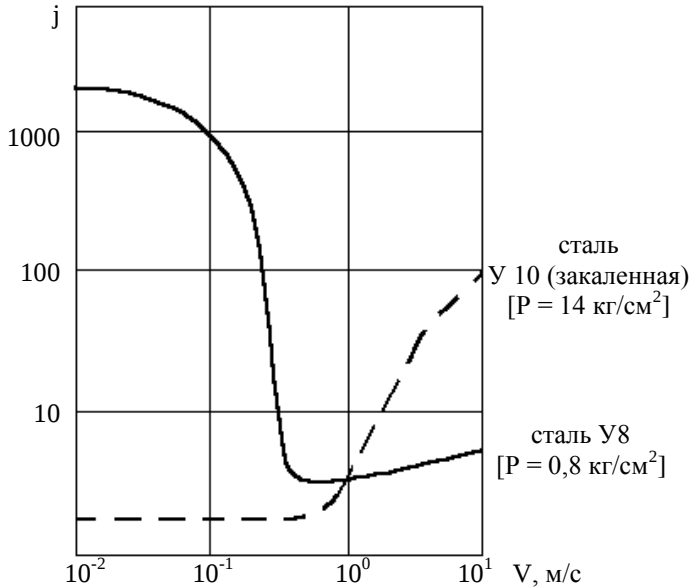


Рис. 2.8. Зависимость интенсивности изнашивания от скорости скольжения

Таким образом, для каждого конструкционного материала, с учетом условий эксплуатации, всегда существует диапазон скоростей, где влияние скорости скольжения малозначительно (до превышения критической скорости).

2.6.2. Влияние контактного давления и механических характеристик материала на интенсивность изнашивания

С повышением давления контактирующих тел интенсивность изнашивания как правило возрастает (независимо от прочих условий контактирования) (рис. 2.9).

Если во фрикционный контакт вступают 2 тела, имеющие различную шероховатость, то в процессе эксплуатации на поверхности контакта устанавливается оптимальная величина шероховатости, независимо от начального значения Rz_1 и Rz_2 , что говорит о процессе приработки трущихся поверхностей и образовании общего микрорельефа поверхности (рис. 2.10).

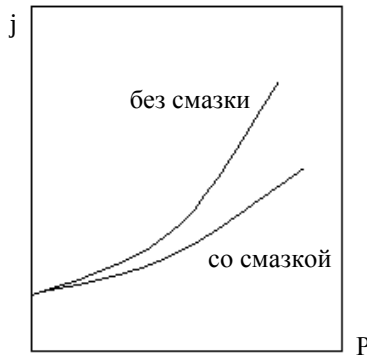


Рис. 2.9. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления

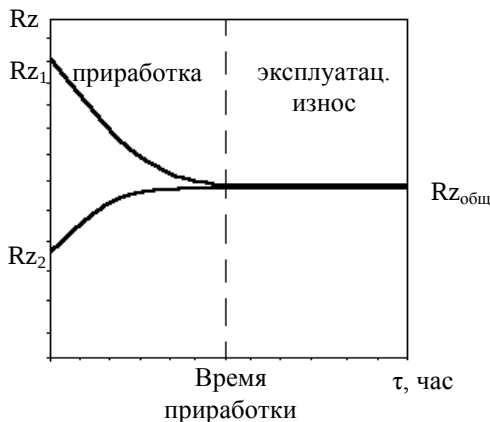


Рис. 2.10. Зависимость шероховатости поверхности от времени эксплуатации

Таким образом, время приработки можно определить как период формирования, общей для двух тел шероховатости R_z .

Об окончании процесса приработки двух поверхностей также можно судить по стабилизации контактного давления из-за приближения фактической поверхности контакта к контурной (рис. 2.11).

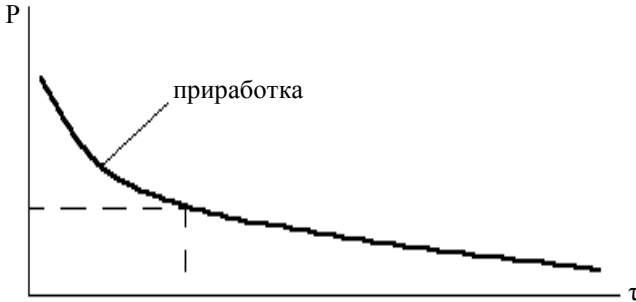


Рис. 2.11. Зависимость контактного давления от времени эксплуатации

Из механических характеристик с износостойкостью связаны в первую очередь предел текучести или прочности, предел усталости и твердость материала.

Так, проф. М.М. Хрущов и М.А. Бабичев исследовали различные материалы и сплавы на износ при трении об абразивное полотно и определяли так называемую относительную износостойкость материалов ε , т.е. отношение износа эталонного материала к износу испытуемого. Исследования показали, что основной характеристикой абразивной износостойкости является твердость металлов и сплавов. Для чистых металлов и термически необработанных сталей имеется линейная зависимость между их твердостью и износостойкостью [2]:

$$\varepsilon = bH$$

где ε — относительная износостойкость абразивного изнашивания; H — твердость по Виккерсу; b — коэффициент пропорциональности ($b \approx 7,3$).

Для термически обработанных сталей износостойкость также возрастает с увеличением твердости, но в меньшей степени.

2.6.3. Влияние температуры контактирующих поверхностей на интенсивность изнашивания

Увеличение температуры в зоне контактирования поверхностей вызывает следующие последствия:

1) Релаксация остаточных поверхностных напряжений, приобретенных в процессе формообразования детали.

2) Ускорение окислительных процессов на поверхностях контактирования, что при повышенных температурах на первой стадии уменьшает интенсивность изнашивания (из-за антифрикционных свойств окисных пленок железа), а на второй стадии приводят к интенсификации изнашивания вследствие появления схватывания второго рода, а с течением времени, толщина окисных пленок возрастает до критического предела и происходит их хрупкое разрушение.

3) Повышение контактной температуры с учетом уровня шероховатости R_z накладывает серьезные ограничения на выбор и эффективность применения смазочных материалов. Все органические смазки, полученные на основе нефтепродуктов, имеют критическую температуру применения (по верхнему пределу из-за коксования и выгорания).

2.7. Прогнозирование срока службы пар трения по критерию износа

Как правило, надежность фрикционного контакта определяется величиной предельного износа $U_{\text{пред}}$.

Предполагается, что отказ наступает при достижении предельного износа. В первом приближении все виды изнашивания, кроме усталостного разрушения и схватывания, можно выразить следующим образом:

$$U = a_n \tau^\beta + b_n, \text{ [мкм]}$$

где τ – безразмерное время нормальной эксплуатации, $\tau = \tau_{\text{норм}} / 1 \text{ час}$;

a_n – коэффициент, характеризующий материалы контактирующей пары и условия изнашивания;

b_n – коэффициент, характеризующий приработочный износ.

β – коэффициент интенсивности изнашивания, который в зависимости от пар трения изменяется в пределах 1-1,5.

Опыт показывает, что для большинства случаев приработочный износ b_n не превышает величины допуска при изготовлении, в результате исходную формулу можно упростить:

$$U = a_n \tau^\beta$$

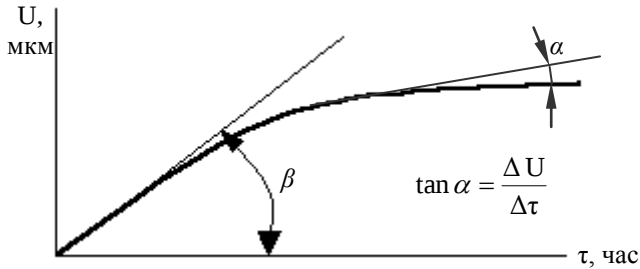


Рис. 2.12. Зависимость износа U от времени τ

Физическую долговечность сопряженных деталей, например: вал – втулка, можно выразить следующей формулой:

$$T = \frac{U_{\text{пред}}}{\tan \alpha}$$

где $\tan \alpha$ – скорость изнашивания в координатах $U - \tau$ (рис. 2.12).

2.8. Эрозионное и коррозионное разрушение поверхностей

Эрозионное разрушение есть результат динамического воздействия на поверхность газопылевого потока, твердой взвеси в жидкости, высокотемпературного потока и электрического разряда.

Коррозия – процесс разрушения поверхности материала при самопроизвольном взаимодействии её с элементами окружающей или технологической среды. Причина коррозии – термодинамическая неустойчивость металлов и в меньшей степени полимеров.

2.8.1. Эрозионное разрушение материалов

Различают следующие виды эрозии:

- 1) Жидкостная;
- 2) Газовая;
- 3) Кавитационная;
- 4) Абразивная;
- 5) Электрическая;
- 6) Абляция материалов в высокотемпературном потоке.

Эрозия происходит по следующим механизмам:

а) Механохимический – когда поверхностный слой разрушается в следствии микроударов твердых частиц. Этот механизм характерен для жидкостной, газовой и абразивной эрозии.

б) Электрическая эрозия возникает в местах шунтирования (присоединение) электрической дуги к рабочей поверхности. Явление наблюдается в держателях электродов сварочных горелок, в рубильниках и т.п.

в) Термический механизм эрозии (абляция) характерен при нахождении материала в высокотемпературном потоке, когда происходит отслоение перегретых и расширенных слоев в направлении перпендикулярном градиенту температуры. При абляции материал разрушается послойно.

г) Кавитационный механизм реализуется при образовании и «схлопывании» парогазовых пузырьков в жидкости. Поверхность рабочих колес в насосах и лопатках турбин разрушается вследствие динамических ударов. В этой связи кавитационный режим эксплуатации недопустим.

Интенсивность эрозии по микроударному механизму падает:

- при уменьшении скорости двухфазного потока;
- при уменьшении относительной скорости взвешенных частиц по сравнению с материалом поверхности;
- при увеличении степени округлости взвешенных частиц;
- при отклонении угла атаки абразивного потока от прямого (менее 30^0 и увеличении более 150^0).

Эрозии подвержены любые материалы, при этом разрушение поверхности по механизму коррозии не отменяется.

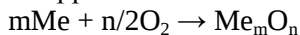
2.8.2. Коррозионное разрушение металлов

Коррозию можно подразделить по виду разрушения поверхностей на общую и локальную, а по механизму протекания на химическую и электрохимическую.

Химический механизм окисления металлов кислородом, кислородосодержащими газами (CO_2 , NO_2 и т.п.) обычно протекает в двух средах:

- а) в газовой фазе;
- б) в жидких не электролитах.

Механизм химической коррозии:



В результате протекания реакции на поверхности металла образуется многослойное покрытие из оксидов.

$P_{\text{O}_2} > P_{\text{Me}_m\text{O}_n}$ – образование оксидов;

$P_{\text{O}_2} < P_{\text{Me}_m\text{O}_n}$ – разрушение оксидов.

Удельный объем оксида, как правило, отличается от удельного объема металла и характеризуется параметром Δ .

$$\Delta = V_{\text{окс}}/V_{\text{Me}}$$

При $\Delta < 1$ в пленке возникают растягивающие напряжения, в результате чего она растрескивается и разрушается, не защищая свежие слои металла;

При $\Delta = 1 - 2$ – образуются плотные защитные пленки;

При $\Delta > 2,3$ – плотные пленки также разрушаются.

Характерные скорости коррозии различных материалов в сухой незагрязненной атмосфере (I), и во влажной промышленной атмосфере (II) отличаются следующим образом:

1) Углеродистые и слаболегированные стали и чугуны:

Скорость коррозии: - 0 – 5 мкм в год (I);

- около 100 мкм в год (II).

2) Нержавеющие стали:

Скорость коррозии: - около 0 мкм в год (I);

- около 0 мкм в год (II).

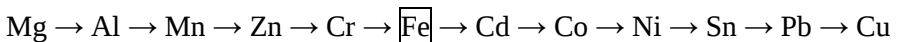
3) Сплавы Zn и Al:

Скорость коррозии: - 0 – 0,5 мкм в год (I);

- 4 – 20 мкм в год (II).

При попадании на поверхность материала жидкости со свойствами электролитов (например: конденсация паров воды) скорость коррозии многократно возрастает из-за выхода ионов металла в жидкую среду.

По своей электрохимической активности распространенные металлы могут быть представлены в виде следующего ряда:



Скорость коррозии металлов в ряду падает слева направо.

При контакте двух металлов (непосредственно или через электролит) «правый» металл ускоряет коррозию «левого».

Скорость коррозии пропорциональна разности потенциалов двух металлов.

В качестве примера рассмотрим результаты взаимодействия основного материала (Fe), защищенного покрытием различного состава (рис. 2.13).

При нарушении сплошности покрытия в случаях б) и в) разрушается более «левый» материал из ряда электрохимической активности.

При выборе материалов работающих в прямом контакте (например: трубная решетка – труба) или в условиях электрохимического кон-

такта (в слабокислых и солевых водных растворах), применение разнородных материалов не целесообразно.

Аналогичная закономерность наблюдается при попадании слабого электролита на защитное покрытие со сквозным дефектом.

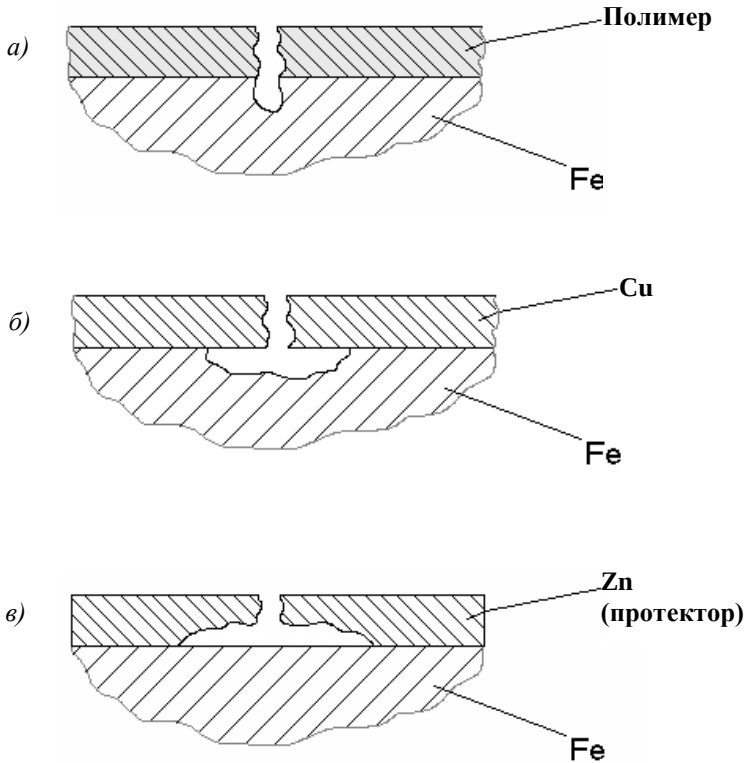


Рис. 2.13. Результаты взаимодействия железа, защищенного покрытиями различного типа

В ряде важных случаев наибольший ущерб причиняет не общая, а локальная коррозия, разрушающая микроучастки поверхности.

Различают следующие виды локальной коррозии:

а) межкристаллитная – она протекает на границах зерен и кристаллов и связана с различной скоростью взаимодействия структурных составляющих сплава с атмосферой;

б) точечная – она протекает на сплавах алюминия и нержавеющей сталей, при наличии в газовой фазе активных компонентов, особенно хлора;

в) щелевая – она протекает из-за разности транспортных свойств электролита на поверхности и в глубине щели;

г) подпленочная – она развивается под пленкой защитного покрытия, при наличии зародыша коррозии.

2.9. Факторы, ускоряющие коррозию

Скорость коррозии существенно возрастает при наличии следующих условий:

- при повышении влажности воздуха выше 70% (из-за конденсации паров воды и растворении в них агрессивных газов);

- работа детали в условиях переменного уровня «жидкость – газ». В условиях умеренного климата скорость коррозии возрастает в 2 раза, а в тропическом – в 4 раза, по сравнению с чисто жидкостной коррозией;

- увеличение загрязнения атмосферы кислыми газами. Увеличивает скорость коррозии до 5 раз, в частности при повышении концентрации CO_2 вдвое межремонтный пробег уменьшается в 1,5 раза;

- появление антропогенных источников коррозии.

Деятельность человека сопровождается следующими видами загрязнения окружающей среды:

- химическое загрязнение воды, почвы и воздуха;
- тепловое загрязнение почвы и воды (например, скорость коррозии алюминиевых сплавов при увеличении температуры с 20 – 40°C до 80 – 90°C увеличивается в 30 – 50 раз в жидких средах);

- загрязнение почвы блуждающими токами (от электротранспорта, от станций катодной защиты, от заземляющих устройств). Борьба с блуждающими токами требует комплексного электрохимического обследования территории и прилегающих территорий с целью разработки активной электрохимической защиты;

- биологическое загрязнение воды и почвы. Оно связано с деятельностью сульфатредуцирующих бактерий, продуктами жизнедеятельности которых являются минеральные кислоты, в частности серная. Эти бактерии, как правило, присутствуют в окружающей среде, но пробуждение их жизнедеятельности связано с деятельностью человека (например, нагрев или аэрация почвы или воды). Как правило, биоаза-

грязнение вторично по отношению к химическому или тепловому загрязнению;

- загрязнение посредством усиления излучения и электромагнитных полей (особенно опасно для пластмасс).

2.10. Усталостные разрушения конструкций и материалов

Усталость – процесс постепенного накопления повреждений (например, в виде трещин), под действием переменных напряжений с модулем меньше предела прочности (σ_b), предела текучести (σ_m), а иногда даже меньше предела упругости.

Переменные нагрузки могут быть как знакопеременными, так и циклическими, как симметричными так и не сбалансированными (рис. 2.14).

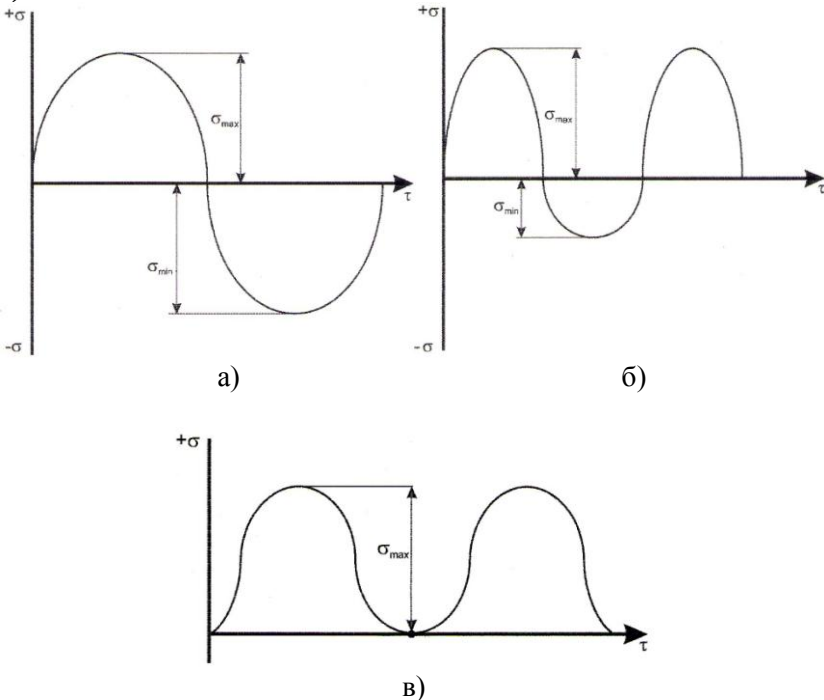


Рис. 2.14. Циклы переменных напряжений:

а) знакопеременный симметричный цикл; б) знакопеременный несимметричный цикл; в) пульсирующий цикл

на рис. 2.14: $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение цикла; $\sigma_{\min}$ – минимальное напряжение цикла.

Циклы нагрузки характеризуются:

1. Амплитудой цикла:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

2. Средним напряжением цикла:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

3. Коэффициентом асимметрии цикла:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Коэффициент, характеризующий пластичность материала:

$$K = \frac{\sigma_{\text{раст}}}{\sigma_{\text{сж}}}$$

Запишем характеристики изменения нагрузки для знакопеременного симметричного цикла (рис. 2.14 а):

$$\begin{aligned}\sigma_a &= \sigma_{\max} = |\sigma_{\min}| \\ \sigma_m &= 0 \\ R &= -1\end{aligned}$$

Критерием усталостного разрушения, характеризующим сопротивление материала циклическим или знакопеременным нагрузкам, является предел выносливости (усталости) σ_{-1} .

Табличные значения предела усталости для различных конструкционных материалов определяются при знакопеременном симметричном нагружении стандартношлифованного образца определенных размеров.

Если условия эксплуатации рассчитываемой конструкции (среда, температура, характер смазки, контактное давление и т.п.), габариты и конфигурация детали (диаметр, наличие галтелей, канавок и т.п.) отличаются от стандартных условий, табличные значения σ_{-1} будут корректироваться с учетом одного или нескольких поправочных коэффициентов.

Предел выносливости σ_{-1} есть наибольшее напряжение, которое выдерживает указываемый материал без разрушения при числе циклов нагружения (N_0) менее N_K , где N_K – база испытаний (рис. 2.15).

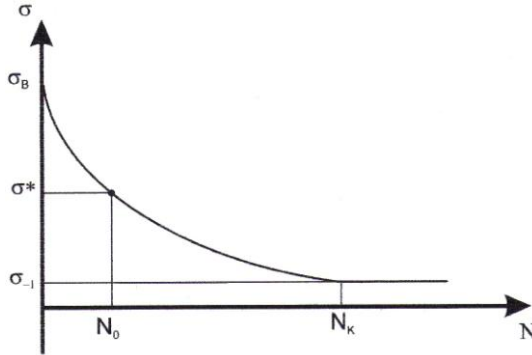


Рис. 2.15. Экспериментальная кривая усталости

Связь между пределом усталости и числом циклов, как правило, записывается в полулогарифмических координатах (рис. 2.16):

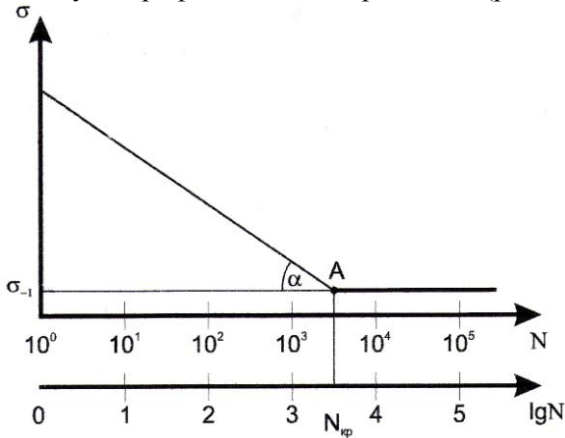


Рис. 2.16. Связь между пределом усталости и числом циклов нагружения

При увеличении количества циклов от 0 до $N_{кр}$ предел выносливости падает практически по линейному закону от $\lg N$. При превышении числа циклов более 10^4 величина предела выносливости, как правило, стабилизируется ($\sigma_{-1} = \text{const}$) и не зависит от увеличения базы нагружения.

$\tan \alpha$ – модуль усталости.

$$\tan \alpha = \frac{\sigma_{\epsilon} - \sigma_{-1}}{N_{кр}}$$

Координата точки А (рис. 2.16) зависит от твердости материала (НВ) по кубической зависимости:

$$N_{кр} = k(HB)^3$$

Внешне усталостный излом характеризуется двумя зонами (рис. 2.17):

- 1 – область постепенного разрушения (накопление микроскопических повреждений и рост усталостных трещин);
- 2 – область долома из-за ослабления сечения.

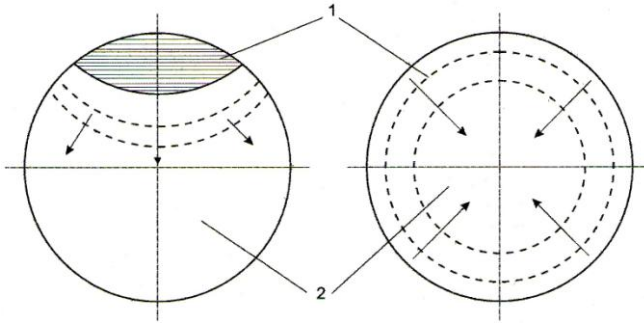


Рис. 2.17. Усталостный излом

Внешне зона 1 (рис. 2.17) отличается «потемнением» и «гладкой» структурой.

Зона 2 имеет крупнозернистую структуру с блеском.

Фронт распространения усталостного излома может быть одно-сторонним, а может иметь цилиндрическую симметрию.

Для снижения опасности усталостных напряжений рекомендуются следующие методы:

1. Повышение напряжений сжатия и твердости поверхностного слоя.
2. Проведение операций химико-термической обработки или пластического деформирования поверхности.
3. Уменьшение шероховатости изделия.

Существуют мало- и многоциклические нагрузки. При переходе от частоты нагружения 300 Гц к 30 Гц усталостная прочность падает в 1,5 – 2 раза. Это легко проиллюстрировать методом адсорбционной усталости (рис. 2.18).

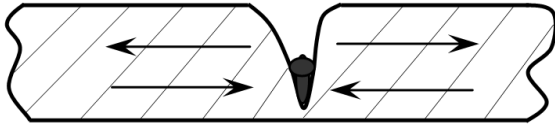


Рис.2.18. Эффект П.А. Ребиндера

Если при снижении частоты нагружения жидкость (смазка, конденсат) попала внутрь трещины, то образовавшаяся внутри канала несжимаемая среда приведет к развитию трещины в глубь материала при знакопеременной нагрузке. Этот процесс получил название эффект П.А. Ребиндера. При высокочастотных колебаниях поперечный размер трещины не успевает изменяться в след за нагрузкой из-за инерционности и жидкость не успевает попасть вглубь трещины.

Последствия усталостного разрушения усиливаются в коррозионно-активной среде

Для снижения вредных последствий усталостного разрушения универсальным образом необходимо улучшить качество поверхности детали (покрытие, химико-термическая обработка, пластичная деформация).

Эти же приемы, как правило, повышают и коррозионную стойкость и износостойкость.

2.11. Оценка технического состояния оборудования [1]

2.11.1. Характерные повреждения сосудов и аппаратов [1]

Повреждения сосудов и аппаратов возникают вследствие воздействия различных эксплуатационных факторов, влияние каждого из которых описывается своей закономерностью, поэтому прогнозирование их ресурса производят на основе всестороннего анализа.

Повреждения сосудов могут быть вызваны эрозийным истиранием стенок рабочей средой, коррозией металла, усталостью, ползучестью, изменением физико-химических свойств металла и другими причинами.

Наиболее часто встречающимися повреждениями поверхностей нагрева являются: трещины и разрывы трубных элементов, которые могут быть вызваны различными причинами (загрязнения внутренних поверхностей, неравномерности температурного поля и др.). Перегрев металла вызывает изменение его структуры, ухудшение механических свойств, повышение окалинообразования.

Возможны также повреждения, вызванные нарушениями норм конструирования и изготовления.

Предельно допустимые значения повреждений, установленные в нормативно-технической документации, называют критериями предельного состояния.

2.11.2. Критерии предельных состояний сосудов и аппаратов [1]

Предельным состоянием сосуда (аппарата), подвергающегося при эксплуатации коррозионно-эрозионному разрушению, является уменьшение толщины его стенок до предельной (расчетной) величины, ниже которой не обеспечивается необходимый запас его несущей способности.

Глубина отдельных локальных повреждений (исключая трещины) может значительно превышать среднюю глубину повреждений без нарушения несущей способности аппарата. Допустимое количество (доля) повреждений на поверхности аппаратов и их размеры должны регламентироваться в зависимости от характера нагрузки на элементы оборудования и свойств применяемых материалов.

Корпус, днище, фланцы и штуцера отбраковывают в следующих случаях:

- если под действием коррозии и эрозии толщина стенки теплообменника достигнет расчетного значения;
- при наличии дефектов сварных швов, обнаруженных неразрушающими методами, а также металлографическими исследованиями: трещин всех видов и направлений, расположенных в металле шва, по линии оплавления и в околошовной зоне основного металла, в том числе и микротрещин, выявленных при микроисследовании; межкристаллитной коррозии сварных швов и износа их толщины до отбраковочных размеров, коррозионного растрескивания;
- при появлении трещин, а также неравномерных коррозионных язв общей площадью более 10 % от поверхности рассматриваемого элемента и глубиной, превышающей 50 % от первоначальной толщины его стенки;
- если элементы теплообменника не выдержали испытания на прочность и плотность.

Трубные решетки отбраковывают при наличии трещин коррозионного и эрозионного разрушения на глубину более 10 % от первоначальной толщины.

Элементы металлоконструкций отбраковывают при износе толщины их стенки на 30 % от проектной.

Для автоклавов установлены следующие критерии предельного состояния (предельных дефектов):

- механический износ (истирание), царапины, коррозионное поражение глубиной свыше величины, предусмотренной в расчете на прочность прибавкой толщины стенки на коррозию;
- вмятины, овальность, износ запорных устройств свыше установленных величин;
- трещины всех видов и направлений;
- дефекты сварных швов;
- единичные шлаковые и газовые включения глубиной свыше 10 % и длиной более 20 % толщины листа;
- коррозионное растрескивание металла в зоне сварных швов, а также в местах коррозионных язв и питтингов.

Для трубопроводов определены следующие количественные критерии предельного состояния:

- износ толщины стенки более 20 %;
- остаточная деформация труб из углеродистых сталей более 2,5 %.

Из сказанного видно, что критерии предельного состояния могут быть качественными (наличие трещин, свищей, вмятин, коррозионного растрескивания) и количественными (величина износа, коррозии, деформации и др.).

2.11.3. Методы оценки величины повреждений [1]

Оценка повреждений основана на индивидуальной диагностике обследуемого оборудования и включает следующие этапы работ:

- оценка технического состояния объекта эксплуатации;
- исследование физико-механических свойств металла;
- оценка фактической нагруженности элементов объекта;
- оценка работоспособности и ресурса оборудования.

Результаты всех выполненных исследований (расчетов) оформляются в виде заключения об остаточном ресурсе с приложениями.

Остаточный ресурс является прогнозируемой величиной. Прогноз осуществляется на основе анализа основных тенденций в изменении технического состояния оборудования и скорости изменения соответствующих параметров технического состояния. Оценка технического состояния оборудования является первым этапом и одним из важ-

нейших элементов определения его остаточного ресурса. Достоверность оценки технического состояния определяет надежность прогноза остаточного ресурса. Этим обусловлена необходимость использования при оценке технического состояния максимально возможной информации об исследуемом объекте. При этом учитываются как отдельные параметры технического состояния, связанные с информацией об отказах отдельных элементов объекта, так и интегральные параметры, описывающие влияние процессов старения оборудования в целом. Интегральные параметры, опирающиеся на статистические данные по эксплуатации оборудования аналогичного типа, определяются снижением его эксплуатационных характеристик, увеличением среднего времени эксплуатации и количества ремонтов оборудования. При прогнозировании изменения технического состояния используются статистические данные по длительной эксплуатации конкретных типов оборудования, накопленные в отраслевых институтах и специализированных организациях.

Основными источниками исходной информации для оценки технического состояния являются помимо указанных выше статистической информации и технической документации также внешний и внутренний осмотры оборудования, толщинометрия, замеры твердости металла и дефектоскопия. Максимальная достоверность исходной информации и надежность средств контроля обеспечиваются использованием современных эффективных методов и средств неразрушающего контроля структурной целостности объекта и физико-механических характеристик материала. Практическая реализация обследования предполагает наличие необходимых технических средств и специалистов соответствующей квалификации.

Результаты обследования служат основанием для принятия решения о необходимости вырезки металла для проведения его детального изучения и специальных исследований.

Замер толщины производится для всех несущих элементов (корпус, днище, люки, штуцера и др.), на которых выявлены видимые следы коррозии.

Контрольные вырезки металла оборудования необходимы для проведения исследования металла с целью оценки изменения его физико-механических свойств под влиянием условий длительной эксплуатации. Из металла контрольной вырезки изготавливаются образцы для проведения металлографических исследований и замера твердости; для испытаний на растяжение при нормальной и повышенной температуре; для испытания на ударный изгиб при нормальной и пониженной тем-

пературе; для оценки химического состава материала. Каждое испытание элементов оборудования выполняется расчетным, экспериментальным или комплексными методами. Расчеты по действующим нормативно-техническим документам выполняются с учетом фактической геометрии конструкции, фактических толщин несущих элементов, выявленных концентраторов напряжений.

Для натурной оценки нагрузок, действующих на основные элементы оборудования, используется натурное тензометрирование, которое рекомендуется выполнять при испытаниях оборудования и в условиях эксплуатации, что позволяет установить фактические напряжения, возникающие в элементах конструкции.

Оборудование считается работоспособным, если его основные силовые элементы имеют запасы прочности не ниже установленных нормативными документами: запас по пределу текучести – 1,5; по пределу прочности – 2,4; по пределу длительной прочности – 1,5; по пределу ползучести – 1,0; по амплитудным напряжениям – 2,0.

Величина запаса определяется фактическими физико-механическими свойствами металла конструкции, и ее фактической нагруженностью.

В случае невыполнения этих условий, а также для оборудования, имеющего дефекты формы (вмятины, выпуклости, гофры) и трещины, работоспособность оборудования определяется после проведения специальных исследований или расчетов.

Прогнозирование ресурса оборудования основывается на результатах обследования его технического состояния. Схема оценки ресурса определяется типом основного повреждающего фактора, действующего на оборудование в процессе эксплуатации. Прогнозирование ресурса производится для оборудования, техническое состояние которого по результатам обследования и исследования физико-механических свойств металла оценивается как удовлетворительное. За ресурс оборудования принимается минимальное из полученных значений расчетного ресурса по действующим повреждающим факторам.

В тех случаях, когда расчетный ресурс оборудования превышает 10 лет, его принимают равным 10 годам. Когда установленный ресурс выработан, для оценки возможности дальнейшей эксплуатации оборудования необходимо выполнить новое исследование.

3. Конструктивные методы повышения надежности

Все методы по повышению надежности и долговечности оборудования можно разделить на три больших класса:

- 1) мероприятия, реализуемые на стадии конструирования оборудования и принятия проектных решений (конструктивные методы);
- 2) мероприятия, реализуемые на стадии изготовления оборудования (технологические методы);
- 3) мероприятия, связанные с эксплуатацией и обслуживанием оборудования (эксплуатационные методы).

Основной смысл эксплуатационных методов повышения надежности – в четком соблюдении в предписании регламентов инструкций по обслуживанию, ремонту и восстановлению оборудования.

3.1. Проектно-конструктивные методы повышения надежности

Они осуществляются через:

- а) принятие стратегических решений по компоновке основных узлов;
- б) по выработке системы требований к характеристикам надежности и долговечности;
- в) по предварительному выбору основных и вспомогательных материалов.

При недостаточном уровне предполагаемой надежности отдельных узлов, принимаются проектные решения по резервированию и дублированию слабых элементов разрабатываемых систем.

В процессе разработки конструкции происходит постоянное уточнение параметров выбранных конструкционных материалов и смазки. Предварительный выбор материала осуществляется по следующим признакам:

- а) в зависимости от условий контакта (фрикционный или антифрикционный);
- б) по типу нагрузки (непрерывная или периодическая);
- в) по эрозионно-коррозионным характеристикам среды;
- г) по требованиям к допустимому загрязнению технологической среды продуктами коррозии и смазки.

На стадии конструирования закладывается не менее 70 – 90 % предельной надежности изделия. Ошибки в проектных решениях могут в незначительной доле компенсироваться на стадии технологического изготовления и обслуживания.

К основным методам конструирования надежных устройств, применительно к антифрикционным контактам, можно считать следующее:

- 1) Замена трения скольжения трением качения;
- 2) Введение компенсаторов износа;
- 3) Установление оптимальных зазоров в трущихся парах;
- 4) Применение съемных быстроизнашивающихся деталей;
- 5) Улучшение способов смазки;
- 6) Введение дополнительных фильтров для очистки смазывающего масла;
- 7) Введение протекторов предохраняющих поверхности от загрязнений;
- 8) Применение эластичных муфт для сглаживания пусковых толчков.

3.2. Роль смазки в парах трения

При работе деталей машин стремятся избежать сухого трения, вводя в нормативный зазор ту или иную смазывающую среду. Смазка внутри зазора удерживается силами абсорбции и налипания. Возможно три варианта контактирования тел со смазкой:

- жидкостное трение;
- полужидкостное трение;
- граничное трение.

Жидкостное трение может быть обеспечено гидродинамическими или гидростатическими методами. Практически все тяжелонагруженные узлы трения в определенные моменты (при пуске и останове, при высоких контактных нагрузках или температурах) работают в условиях граничного трения, когда слой смазки не превышает $0,1 - 0,2$ мкм.

С увеличением скоростей контактирующих тел и с уменьшением давления в сопряжениях требуется смазка с меньшей плотностью и вязкостью.

Эффективность взаимодействия смазки с поверхностями увеличивается при наличии в ней поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Введение жидкой смазки может усилить разрушение поверхности и износ в двух случаях:

- а) при попадании в смазку абразивных частиц;
- б) при наличии трещин в контактирующих поверхностях, когда проникновение смазки в углубление предопределяет дальнейшее разрастание щели по механизму расклинивающего эффекта П.А. Ребиндера.

Этот эффект проявляется более сильно (в 3 – 4 раза) при наличии в смазке ПАВ и работе пары трения в условиях циклической нагрузки.

ПАВ неоднозначно влияет на надежность с одной стороны, снижая силу трения, а с другой стороны способствуя проникновению смазки в трещину. По консистенции смазки делятся на жидкие, консистентные и твердые. Твердые смазки применяют в узлах, где недопустимо, попадание смазки в технологическую среду (пищевые аппараты и т.п.), а также при высоких температурах. В качестве твердых смазок используют анизотропные материалы типа – графит, полимерграфит, диоксид молибдена.

В качестве конструкционных антифрикционных материалов используют материалы двух типов:

- самосмазывающиеся материалы (металлокерамика, порошковые псевдосплавы);
- покрытия и материалы, использующие эффект избирательного переноса (медные сплавы). В этом случае атомы меди переходят с одной поверхности на другую и обратно, не изменяя массу контактирующих поверхностей.

3.3. Технологические методы повышения надежности

Технологические методы "работают" на стадии изготовления оборудования и реализуются путем улучшения качества поверхности (твердость, сплошность, оптимальный микрорельеф).

Эти методы, универсально повышающие надежность оборудования при

всех механических разрушения поверхностей и конструкций.

- а) контактный и эрозионный износ;
- б) различные виды коррозии;
- в) усталостные разрушения при циклической нагрузке, особенно в жидких средах.

Все методы технологического упрочнения можно разделить на три

больших группы:

- 1) Методы пластического деформирования поверхности;
- 2) Методы термической и химико-термической обработки (ХТО);
- 3) Методы нанесения защитных покрытий.

3.4. Методы поверхностного деформирования

Методы поверхностного деформирования применяются в следующих случаях:

- как финишная обработка поверхности (для создания необходимой регулярной микро шероховатости и напряжения сжатия поверхностного слоя);
- как предварительная подготовка поверхности под альтернативные методы (ХТО или нанесение покрытий).

В технологии химического машиностроения, как правило, используют следующие методы:

- дробеструйная обработка;
- обкатка роликом или шариками;
- чеканка;
- обкатка вибророликами.

Из указанных методов все технологии кроме статической обкатки роликом выполняются в динамическом режиме. В результате уменьшаются энергозатраты, и увеличивается глубина наклепываемого слоя.

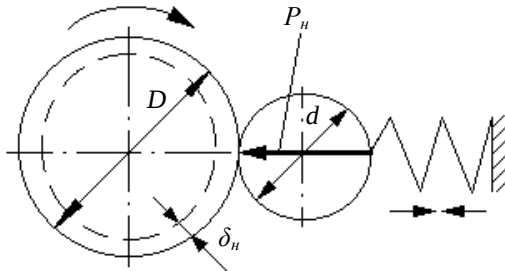


Рис. 3.1. Схема поверхностного деформирования детали

Усилие P_n и глубина наклепа δ_n (рис. 3.1) определяются по следующим зависимостям:

$$P_n = \frac{Dbq^2}{0,126E \left(\frac{D}{d} + 1 \right)} \text{ [кгс]}$$

$$\delta_n = \sqrt{\frac{P_n}{2\sigma_m}} \text{ [мм]}$$

где D, d – диаметры детали и ролика, мм;
 b – ширина ролика, мм;
 E – модуль Юнга, кгс/мм²;

q – контактное давление, кг/мм², $q = (1,8 \dots 2,1)\sigma_m$

При поверхностном деформировании необходимо соблюсти обязательное условие – материал инструмента или дроби многократно должен быть более твердый, чем материал детали.

3.5. Химико-термические и термические методы упрочнения

Разделение на ХТО и термические методы сравнительно условно. Как правило, термические процессы (закалка, отпуск, нормализация) сопровождаются неконтролируемым взаимодействием с окружающей средой. При ХТО контролируемая атмосфера химически реагирует с металлом или сплавом. Общей чертой всех процессов данного вида является обязательный нагрев поверхности или всего объема детали, как правило, выше температуры рекристаллизации (более 40% от температуры плавления).

Управляющими воздействиями при проведении термической обработки является:

- а) температура нагрева;
- б) время выдержки при заданной температуре;
- в) скорость охлаждения до температуры окружающей среды.

Скорость охлаждения, как правило, регулируется выбором состава окружающей среды: в воде скорость охлаждения металла достигает 600 °С в секунду; в масле скорость охлаждения металла достигает 150 °С в секунду.

При ХТО основное управляющее воздействие (кроме температуры и времени) состав и концентрация активной среды. Наиболее распространены следующие процессы ХТО: азотирование, цианирование, борирование и т.д. Например: азотирование проводится не воздухом и нагретым азотом, а в среде аммиака, который разлагаясь (диссоциируя) при температуре 500...600 °С образует атомарный азот, являясь активным компонентом при азотировании. Продолжительность процесса азотирования в потоке аммиака составляет около трех суток, для стоклограммовой детали. Две трети времени занимает процесс нагрева и охлаждения (при толщине покрытия 1,5 – 2 мм).

Целью ХТО является:

- целенаправленное изменение структуры поверхности детали;
- увеличение микро твердости и износостойкости поверхностного слоя;
- повышение коррозионной стойкости;

- создание твердого подслоя под металлические и керамические покрытия.

Как правило, процесс ХТО проводят в стационарном режиме, а нагрев детали осуществляется или объемным методом (в печах) или поверхностными методами повышения температуры. Последние воздействия более экономичны и осуществляются в индукционных печах путем газопламенного или плазменного нагрева.

В отличие от деформационных методов процессы ХТО несколько увеличивает линейные размеры детали, что необходимо учитывать при разработке технологии упрочнения.

3.6. Нанесение защитных покрытий

Эти методы наиболее универсальны по применению, и ими могут быть нанесены практически любые материалы:

- лакокрасочные материалы;
- полимеры (термопласты и реактопласты);
- металлы и сплавы;
- керамические порошки и стекломали;
- комбинированные покрытия (металл + полимер).

Технологии нанесения лакокрасочных и полимерных материалов не требуют высоких температур процесса, и осуществляются традиционными способами:

- 1) Механическое нанесение (кисть, валик и т.п.);
- 2) Окунание;
- 3) Воздушное или центробежное нанесение;
- 4) Электростатическое нанесение порошковых полимеров.

Металлические материалы наносятся в основном двумя способами:

а) Химическое или электрохимическое осаждение в ваннах из раствора электролита. Таким методом можно получать тонкослойное покрытие толщиной 0,05 – 0,5 мм. При этом образуются вредные стоки, содержащие высоковалентные соединения хрома, никеля и меди.

б) Весь спектр металлических, керамических и полимерных материалов в порошковом состоянии можно наносить путем газотермического напыления. Основные методы: электродуговая металлизация, газопламенное напыление и наплавка. Эти методы объединяет разогрев и разгон порошка в высокотемпературном потоке газа.

4. Задания для проверки знаний

4.1. Задание №1

Задание №1 состоит из трех частей.

Каждый студент выполняет вариант заданий, обозначенный тремя последними цифрами зачетной книжки (шифра):

6	0	4	<u>8</u>	<u>0</u>	<u>2</u>
			<u>a</u>	<u>б</u>	<u>в</u>

По цифре a выбирается вариант задания № 1.1, по цифре б – вариант задания № 1.2, по в – вариант задания № 1.3.

Задание № 1.1.

1. Дайте определение основных свойств, характеризующих надежность объекта: безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости.
2. Дайте определение следующих состояний, характеризующих надежность объекта: работоспособность, исправное состояние, неисправное состояние.
3. Приведите определения следующих терминов теории надежности: дефект, отказ, ремонтируемый объект, неремонтируемый объект.
4. Дайте определение следующих показателей безотказности: вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказов, параметр потока отказов, частота отказов. Приведите формулы для расчета этих показателей.
5. Дайте определение следующих показателей долговечности: средний ресурс, γ -процентный ресурс, назначенный ресурс, средний срок службы. Приведите формулы для их расчета.
6. Дайте определение следующих комплексных показателей надежности: коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического исследования. Приведите формулы для расчета этих показателей.
7. Дайте определение следующих коэффициентов, характеризующих работу оборудования: коэффициент экстенсивности, коэффициент интенсивности, коэффициент использования аппарата. Приведите формулы для расчета этих показателей.
8. Приведите основные характеристики экспоненциального закона распределения отказов.
9. Приведите основные характеристики нормального закона распределения отказов.
10. Приведите основные характеристики закона распределения отказов Вейбулла.

Задание № 1.2.

На следующее задание дайте определение методов, основных показателей, приведите примеры из промышленности.

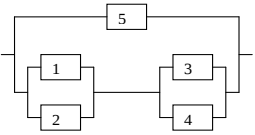
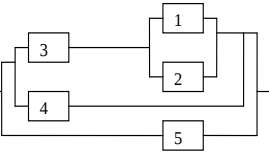
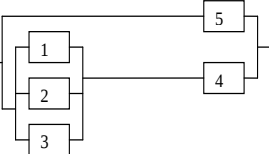
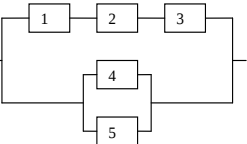
1. Приведите классификацию видов разрушения деталей машин и аппаратов. Охарактеризуйте усталостные изломы. Влияние концентраторов напряжений и среды на предел выносливости. Методы повышения усталостной прочности металлов.
2. Приведите классификацию видов разрушения деталей машин и аппаратов. Абразивный износ деталей. Методы борьбы с абразивным износом.
3. Приведите классификацию видов разрушения деталей машин и аппаратов. Основные виды износа и повреждения деталей машин при трении. Материалы для антифрикционных узлов трения.
4. Износ и повреждаемость при трении при наличии абразивной среды. Схватывание первого и второго рода. Материалы, стойкие при абразивном воздействии.
5. Эрозионно-кавитационное разрушение машин и аппаратов. Материалы стойкие при гидроэрозии.
6. Износ и повреждаемость при трении. Классификация видов износа и повреждаемости при трении. Упрочнение поверхностей деталей машин поверхностным деформированием (наклепом). Дробеструйный наклеп. Упрочнение обкаткой.
7. Классификация видов разрушения деталей машин. Контактная усталость металлов. Повышение долговечности наплавкой износостойких материалов на рабочие поверхности деталей машин.
8. Коррозионное повреждение деталей химического оборудования. Основные виды коррозии. Изнашивание деталей в коррозионно-активных средах. Повышение эксплуатационной надежности деталей химикотермической обработкой: хромированием, титанированием, борированием.
9. Эрозионно-коррозионное разрушение металлов. Материалы стойкие при абразивном воздействии. Напыление рабочих поверхностей деталей (металлизация).
10. Усталостное разрушение деталей химического оборудования. Характеристика изломов. Применение методов упрочняющей технологии для повышения усталостной прочности деталей машин.

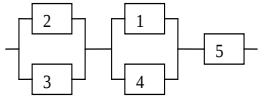
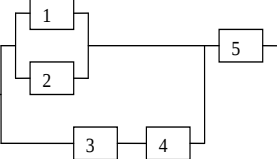
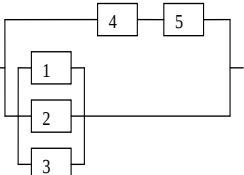
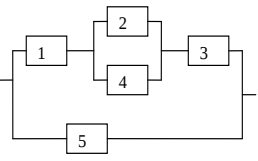
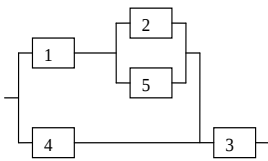
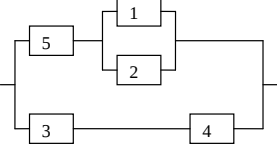
Задание № 1.3.

Система состоит из n_i элементов, $i = 1 \div 5$. Вид структурной схемы надежности (ССН) задан. Определить вероятность безотказной работы системы P_n , если известны законы распределения отказов и значения параметров.

Вероятность безотказной работы элементов $n_1 \div n_4$ подчинена экспоненциальному закону, а n_5 – закону Вейбулла. Исходные данные приведены в таблице 4.1.

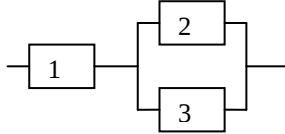
Таблица 4.1. Исходные данные для задания № 1.3.

Вариант №	Вид ССН	Закон распределения времени безотказной работы элемента и значения его параметров		τ , мес
		Для элементов $n_1 \div n_4$, мес ⁻¹	Для элемента n_5	
1	2	3	4	5
1		$\lambda_1 = \lambda_2 =$ $= \lambda_3 = \lambda_4 = \frac{1}{24}$	$\alpha=2$ $\lambda_5=0,5 \cdot 10^{-2}$	10
2		$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{20}$ $\lambda_3 = \lambda_4 = \frac{1}{40}$	$\alpha=1,8$ $\lambda_5=0,2 \cdot 10^{-2}$	11
3		$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{20}$ $\lambda_4 = \frac{1}{40}$	$\alpha=2,1$ $\lambda_5=0,25 \cdot 10^{-3}$	9
4		$\lambda_1 = \lambda_4 = \frac{1}{40}$ $\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{20}$	$\alpha=1,9$ $\lambda_5=0,5 \cdot 10^{-2}$	12

1	2	3	4	5
5		$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{20}$ $\lambda_3 = \lambda_4 = \frac{1}{40}$	$\alpha=1,9$ $\lambda_5=0,2 \cdot 10^{-2}$	9
6		$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{20}$ $\lambda_3 = \lambda_4 = \frac{1}{40}$	$\alpha=2,1$ $\lambda_5=0,2 \cdot 10^{-2}$	11
7		$\lambda_1 = \lambda_4 = \frac{1}{40}$ $\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{20}$	$\alpha=1,8$ $\lambda_5=0,3 \cdot 10^{-2}$	12
8		$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{20}$ $\lambda_4 = \frac{1}{30}$	$\alpha=2,2$ $\lambda_5=0,2 \cdot 10^{-2}$	10
9		$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{24}$ $\lambda_3 = \lambda_4 = \frac{1}{30}$	$\alpha=1,7$ $\lambda_5=0,4 \cdot 10^{-2}$	12
0		$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{30}$ $\lambda_3 = \lambda_4 = \frac{1}{36}$	$\alpha=2$ $\lambda_5=0,2 \cdot 10^{-2}$	11

Пример. Система состоит из n_i элементов, $i = 1, 2, 3$. вид структурной схемы надежности (ССН) задан. Определить вероятность безотказной работы (ВБР) системы P_Σ , если известны законы распределения отказов и значения параметров.

Вероятность безотказной работы элементов n_2 и n_3 подчинена экспоненциальному закону, а n_1 - закону Вейбулла. $\lambda_2 = \lambda_3 = 0,025 \text{ мес}^{-1}$, $\lambda_1 = 0,002 \text{ мес}^{-1}$, $\alpha = 2$, $\tau = 10 \text{ мес}$.



Решение. Определим вероятность безотказной работы:

- для 1 элемента по закону отказов Вейбулла, т.к. $\lambda = \text{const}$:

$$P_1 = e^{-\lambda \tau^\alpha} = e^{-0,002 \cdot 10^2} = 0,82;$$

- для 2 и 3 элементов по экспоненциальному закону отказов:

$$P_2 = P_3 = e^{-\lambda \tau} = e^{-0,025 \cdot 10} = 0,78.$$

Согласно схеме элементы 2 и 3 соединены параллельно. Определим их суммарную вероятность отказа:

$$Q_{\Sigma 2,3} = Q_2 Q_3 = (1 - P_2)(1 - P_3) = (1 - 0,78)^2 = 0,048;$$

найдем ВБР для этих элементов:

$$P_{2,3} = 1 - Q_{\Sigma 2,3} = 1 - 0,048 = 0,952.$$

Далее определим ВБР всей системы как произведение P_1 и $P_{2,3}$:

$$P_\Sigma = P_1 P_{2,3} = 0,82 \cdot 0,952 = 0,78.$$

4.2. Задание № 2

Соединение зубчатого колеса со сплошным валом диаметром d соответствует определенной посадке. Соединение нагружено вращающим моментом, заданным случайной нормально распределенной величиной со средним значением T_{cp} и коэффициентом вариации v_T . Определить вероятность безотказной работы соединения по критерию прочности сцепления и по критерию прочности охватывающей детали (ступицы колеса), если известны: диаметр ступицы зубчатого колеса D , длина посадочной поверхности l , высота микронеровностей посадочных поверхностей R_{z1} и R_{z2} , модуль упругости материала деталей E , среднее значение и коэффициент вариации коэффициента трения f_{cp} и v_f , коэффициент, учитывающий уменьшение со временем давления K , среднее значение предела текучести материала охватывающей детали σ_{t2} , коэффициент вариации v_σ .

Расчет произвести по данным, приведенным в таблице 4.2., выбор которых произвести по последней цифре шифра.

Таблица 4.2. Характеристика соединений

ПОКАЗАТЕЛИ	В а р и а н т ы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Диаметр вала d , мм	52	52	54	62	72	52	54	62	42	62
Диаметр ступицы колеса D , мм	100	100	110	112	120	100	110	120	100	120
Длина посадочной поверхности l , мм	100	110	90	80	100	80	90	100	90	80
Посадка	$\frac{H8}{h8}$	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H8}{h8}$	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H8}{h8}$	$\frac{H8}{h8}$	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H8}{h8}$
Вращающий момент T_{cp} , Нм	1200	1400	1300	1600	1800	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент вариации момента, v_T	0,10	0,12	0,10	0,12	0,10	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12
Среднее значение коэффициента трения f_{cp}	0,08	0,12	0,10	0,09	0,08	0,11	0,10	0,08	0,09	0,12
Коэффициент вариации коэффициента трения v_f	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
Среднее значение предела текучести материала охватывающей детали σ_{t2} , МПа	580	620	850	760	830	580	620	850	760	830
Коэффициент вариации v_t	0,05	0,06	0,07	0,06	0,05	0,07	0,06	0,07	0,06	0,05
Модуль упругости материала (сталь) $E \cdot 10^5$, МПа	2,1	2,0	2,1	2,0	2,1	2,1	2,0	2,1	2,0	2,1
Шероховатость посадочных поверхностей	Вала, R_{z1}	6,3	5	4	3,2	5	6	4	5	3,2
	Колеса, R_{z2}	4	3,2	5	5	4	3,2	5	4	3,2
Коэффициент, учитывающий уменьшение со временем давления K	1,5	1,4	1,3	1,6	1,5	1,3	1,4	1,6	1,5	1,4

Пример [3]. Соединение зубчатого колеса со сплошным валом диаметром $d=46$ мм соответствует посадке $H8/x8$. Соединение нагружено вращающим моментом, заданным случайной нормально распределенной величиной со средним значением $T_{cp}=1050$ Нм и коэффициентом вариации $v_T=0,12$. Определить вероятность безотказной работы соединения по критерию прочности сцепления и по критерию прочности охватывающей детали (ступицы колеса), если известно, что диаметр ступицы зубчатого колеса $D=85$ мм, длина посадочной поверхности $l=60$ мм, высота микронеровностей посадочных поверхностей $R_{z1}=4$ мкм, $R_{z2}=6$ мкм, модуль упругости материала (сталь) деталей $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа, среднее значение и коэффициент вариации коэффициента трения соответственно равны $f_{cp}=0,12$, $v_f=0,1$, коэффициент, учитывающий уменьшение со временем давления, равен $K=1,5$, среднее значение предела текучести материала охватывающей детали $\sigma_{t2}=580$ МПа, коэффициент вариации $v_t=0,06$.

Решение. Среднее значение N_{cp} и коэффициент вариации v_N натяга определяем в зависимости от допусков диаметров вала и отверстия $t=t_e=t_E=39$ мкм, а также нижнего отклонения диаметра вала $ei=97$ мкм (значения выбраны по таблицам допусков Приложение 2):

$$N_{cp}=ei=97 \text{ мкм};$$

$$v_N = \frac{\sqrt{2}t}{6ei} = \frac{\sqrt{2} \cdot 39}{6 \cdot 97} = 0,0948.$$

Поправка на обмятие микронеровностей:

$$u=1,2(R_{z1}+R_{z2})=1,2(4+6)=12 \text{ мкм}.$$

Определяем коэффициент, необходимый для определения среднего значения давления на посадочной поверхности:

$$\psi = \frac{1 + (d/D)^2}{1 - (d/D)^2} = \frac{1 + (46/85)^2}{1 - (46/85)^2} = 1,828.$$

Среднее значение давления на посадочной поверхности:

$$p_{cp} = \frac{(N_{cp} - u)E \cdot 10^{-3}}{d(1 + \psi)} = \frac{(97 - 12)2,1 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{46(1 + 1,828)} = 137,2 \text{ МПа}.$$

Коэффициент вариации давления p :

$$v_p = v_N \frac{1}{(1 - u/N_{cp})} = 0,0948 \frac{1}{(1 - 12/97)} = 0,108.$$

Определяем среднее значение и коэффициент вариации предельного по прочности сцепления момента:

$$\bar{T}_{lim} = 0,5 \cdot 10^{-3} \pi d^2 l p_{cp} f_{cp} \frac{1}{K} = 0,5 \cdot 10^{-3} \pi 46^2 \cdot 60 \cdot 137,2 \cdot 0,12 \frac{1}{1,5} = 2187,8 \text{ Нм};$$

$$v_{lim} = \sqrt{v_p^2 + v_f^2} = \sqrt{0,108^2 + 0,1^2} = 0,147.$$

Коэффициент запаса прочности сцепления по средним значениям:

$$\bar{n}_c = \frac{\bar{T}_{lim}}{T_{cp}} = \frac{2187,8}{1050} = 2,08.$$

Квантиль нормированного нормального распределения:

$$u_p = -\frac{\bar{n}_c - 1}{\sqrt{\bar{n}_c^2 v_{lim}^2 + v_T^2}} = -\frac{2,08 - 1}{\sqrt{2,08^2 \cdot 0,147^2 + 0,12^2}} = -3,288.$$

Вероятность безотказной работы P_c по критерию прочности сцепления, определенная по Приложению 1 в зависимости от u_p , равна $P_c = 0,9995$.

Определение вероятности безотказной работы соединения с натягом по критерию прочности охватывающей детали начнем с определения среднего значения и коэффициента вариации эквивалентного напряжения у посадочной поверхности ступицы колеса:

$$\bar{\sigma} = \frac{2 p_{cp}}{1 - (d/D)^2} = \frac{2 \cdot 137,2}{1 - (46/85)^2} = 388 \text{ МПа};$$

$$v = v_p = 0,108.$$

Определяем коэффициент запаса прочности по средним напряжениям:

$$\bar{n} = \frac{\sigma_{t2}}{\bar{\sigma}} = \frac{580}{388} = 1,49.$$

Квантиль нормированного нормального распределения:

$$u = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 v_t^2 + v^2}} = -\frac{1,49 - 1}{\sqrt{1,49^2 \cdot 0,06^2 + 0,108^2}} = -3,49.$$

Вероятность безотказной работы по P_{II} критерию прочности охватывающей детали соединения (Приложение 1) $P_{II} = 0,9998$.

5. Литература

1. Шубин В.С., Рюмин Ю.А. Надёжность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств. М.: Химия, КолосС, 2006. 359 с.
2. Проников А.С. Надёжность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
3. Решетов Д.Н, Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. М.: Высшая школа, 1988. 238 с.
4. Яхьяев Н.Я., Кораблин А.В. Основы теории надежности. 2-е изд., перераб. М.: Академия, 2014. 208 с.
5. Решетов Д.Н. Работоспособность и надёжность деталей машин. М.: Высшая школа, 1974. 206 с.
6. ГОСТ 27.002. Надежность в технике. Термины и определения.
7. ГОСТ 27.003. Надежность в технике. Выбор и нормирование показателей надежности. Основные положения.
8. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность). М.: МСХА, 2001. 616 с.

Таблица П.1. Зависимость квантили нормального распределения от ВБР

Нормальное распределение			
Кван- тиль u_p	Вероят- ность без- отказной работы P_τ	Кван- тиль u_p	Вероят- ность без- отказной работы P_τ
0,000	0,5000	-1,751	0,9600
-0,100	0,5398	-1,800	0,9641
-0,126	0,5500	-1,881	0,9700
-0,200	0,5793	-2,000	0,9772
-0,253	0,6000	-2,054	0,9800
-0,300	0,6179	-2,100	0,9821
-0,385	0,6500	-2,170	0,9850
-0,400	0,6554	-2,200	0,9861
-0,500	0,6915	-2,300	0,9893
-0,524	0,7000	-2,326	0,9900
-0,600	0,7257	-2,400	0,9918
-0,674	0,7500	-2,409	0,9920
-0,700	0,7580	-2,500	0,9938
-0,800	0,7881	-2,576	0,9950
-0,842	0,8000	-2,600	0,9953
-0,900	0,8159	-2,652	0,9960
-1,000	0,8413	-2,700	0,9965
-1,036	0,8500	-2,748	0,9970
-1,100	0,8643	-2,800	0,9974
-1,200	0,8849	-2,878	0,9980
-1,282	0,9000	-2,900	0,9981
-1,300	0,9032	-3,000	0,9986
-1,400	0,9192	-3,090	0,9990
-1,500	0,9332	-3,291	0,9995
-1,600	0,9452	-3,500	0,9998
-1,645	0,9500	-3,719	0,9999
-1,700	0,9554		

Таблица П.2. Предельные отклонения валов (ГОСТ 25347)

Интервал размеров, мм	Поля допусков	
	u8	x8
	Верхние (es) и нижние (ei) отклонения, мкм	
Св. 18 до 24	+ 74	+ 87
	+ 41	+ 54
Св. 24 до 30	+ 81	+ 97
	+ 48	+ 64
Св. 30 до 40	+ 99	+ 119
	+ 60	+ 80
Св. 40 до 50	+ 109	+ 136
	+ 70	+ 97
Св. 50 до 65	+ 133	+ 168
	+ 87	+ 122
Св. 65 до 80	+ 148	+ 192
	+ 102	+ 146
Св. 80 до 100	+ 178	+ 232
	+ 124	+ 178
Св. 100 до 120	+ 198	+ 264
	+ 144	+ 210

Таблица П.3. Предельные отклонения отверстий (ГОСТ 25347)

Интервал размеров, мм	Поля допусков	
	H8	
	Верхние (ES) и нижние (EI) отклонения, мкм	
Св. 18 до 24	+ 33	
Св. 24 до 30	0	
Св. 30 до 40	+ 39	
Св. 40 до 50	0	
Св. 50 до 65	+ 46	
Св. 65 до 80	0	
Св. 80 до 100	+ 54	
Св. 100 до 120	0	

Учебное издание

**ОСНОВЫ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ
ОБОРУДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Составители:
ЛОБАНОВ Николай Федорович
КАМЕНСКИЙ Михаил Николаевич

Редактор Туманова Е.М.
Подписано в печать г. Формат 60×84¹/₁₆
Бумага «Снегурочка». Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. .
Тираж 50 экз. Заказ №

ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»
Новомосковский институт (филиал). Издательский центр.
Адрес университета: 125047, Москва, Миусская пл., 9
Адрес института: 301650, Тульская обл., Новомосковск, ул. Дружбы, 8