

6 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ (2)

6.1 ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Особенностью механических систем является многообразие причин отказов элементов. Основными процессами, вызывающими снижение надежности и отказы механических элементов, являются трение и износ, усталостное старение, механические, физические и химические контактные явления, различные виды коррозии, ухудшение свойств (в первую очередь механических) в результате различных физико-химических процессов и внешних воздействий, изменение геометрической формы и размеров деталей.

В механике твердого тела разработано много моделей разрушения, учитывающих механические, химические и физико-химические процессы, внешние и внутренние факторы. Механическое разрушение материалов рассматривается не как критическое событие, когда напряжения достигают предела прочности, а как постепенный кинетический термоактивационный процесс, развивающийся в механически нагруженном материале. В соответствии с этим одним из фундаментальных свойств механической прочности материалов является ее зависимость от времени.

Соответственно деформация и разрушение должны характеризоваться не предельными напряжениями, а скоростью деформации и разрушения или долговечностью.

6.1.1 ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ

Основными причинами отказов механических элементов являются износ и нарушение условий трения, недостаточная прочность по критериям статистической прочности, мало- или многоциклового усталости, недопустимые деформации, старение и коррозия материалов, нарушение нормальных условий функционирования и неправильное назначение допусков.

Наибольшее число отказов механических систем происходит из-за механических разрушений.

Время разрушения материала зависит от его свойств, механических напряжений, обусловленных воздействием динамической нагрузки или циклического изменения температуры. Механизм разрушения и, соответственно, долговечность материала определяются постепенным накоплением локальных дефектов: вакансий, дислокаций, пластических деформаций и микротрещин. Внешние факторы (вибрация, циклическое изменение температуры, влажность и др.) влияют на интенсивность разрушения.

В общем случае скорость процессов механического разрушения нагруженного твердого тела и время его разрушения зависят от структуры и свойств материала, от величины напряжения и температуры. Кинетическая теория прочности учитывает влияние теплового движения (флуктуаций тепловой

энергии) на процессы деформации и разрушения. Разрушение материала может происходить при любых напряжениях (в том числе меньших предела прочности), и разрывное напряжение зависит от времени действия нагрузки и температуры.

Использование в качестве характеристики материала предельно допустимых напряжений не имеет смысла без указания времени, в течение которого материал находится под нагрузкой.

Изменения прочностных характеристик материалов при тепловой обработке, деформировании или при изменении их чистоты, связаны с изменением величины структурного коэффициента γ , который, таким образом, является количественной характеристики прочности (меры сопротивления разрушению).

В некоторых случаях существенное влияние на кинетику процесса разрушения могут оказывать побочные явления, уменьшающие прочность материалов (например, воздействие окружающей среды или поверхностно-активных веществ).

Прочность, возникновение и развитие микротрещин в *металлах и сплавах* обусловлены, в основном, двумя процессами: разрывом межатомных связей за счет тепловых флуктуаций и направленной диффузией вакансий к трещинам, приводящей к росту трещин.

В области больших напряжений и сравнительно низких температур действует механизм разрушения, обусловленный процессом последовательного флуктуационного разрыва атомных связей в кристаллической решетке, в области малых напряжений и высоких температур действует диффузионный механизм разрушения, основанный на росте микротрещин путем притока вакансий или на образовании очагов нарушения связей в месте скопления избыточного числа вакансий.

Процесс разрушения нагруженных *полимерных материалов* представляют собой разрыв внутримолекулярных химических связей в результате тепловых флуктуаций, т.е. процесс термодеструкции полимерных цепей, активированный механическими напряжениями. Для описания кинетики процессов деформации и разрушения полимерных материалов, кроме флуктуационных разрывов химических связей, необходимо также учитывать влияние молекулярных перегруппировок, определяющих развитие эластических деформаций.

Скорость деформирования полимеров характеризуется скоростью молекулярных перегруппировок, скорость разрушения - скоростью разрывов химических связей, скоростью накопления нарушений (полостей и трещин) и скоростью роста трещин.

Первичными продуктами процесса разрыва химических связей являются свободные макрорадикалы с неспаренными электронами на концах с разными временем жизни и стабильностью.

Большое практическое значение имеют процессы разрушения полимерных материалов, армированных волокнами. Вследствие того, что волокна имеют дефекты, распределенные по их длине, разрушение первоначально происходит в некоторых случайных сечениях при нагрузках, меньших разрушающих нагрузок для составного материала. В местах разрушения возникают концентрации напряжений, которые могут вызвать появление трещин в основном материале. Затем за счет сдвига основного материала смежные трещины соединяются, процесс продолжается до общего разрушения составного материала.

6.1.2 ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН

Кинетика разрушения и долговечность материалов определяется, прежде всего, развитием трещин (причиной отказов металлических сосудов под давлением в 94% случаев является образование и развитие трещин).

Механизм процесса разрушения при длительном воздействии нагрузки сводится к постепенному росту микротрещин до критического размера в результате флуктуационного разрыва атомных связей в вершине трещины.

Трещины образуются вскоре после приложения нагрузки, как правило, на различного рода дефектах (включениях, неоднородностях структуры, царапинах и т.д.) и их развитие занимает основную часть времени до разрыва (в металлах - около 90%, в полимерных материалах - до 99%).

В процессе роста трещин различаются две стадии: ускоренного роста с возрастающей скоростью и быстрого роста с постоянной скоростью.

При сравнительно небольших напряжениях и, соответственно, медленном разрушении длительность второй стадии значительно меньше первой. На первой стадии существенную роль играют тепловые флуктуации атомов и молекул: вероятность разрыва связей между молекулами и атомами у вершины трещины и, соответственно, скорость процесса увеличиваются с увеличением температуры и упругих напряжений.

На второй стадии процесс разрушения не зависит от температуры, т.е. представляет собой безактивационный атермический процесс разрушения локальными напряжениями, близкими к пределу молекулярной прочности, и связан со скоростью перераспределения упругой энергии.

Условием роста трещины является превышение изменения энергии упругих деформаций над значением прироста поверхностной энергии (критерий Гриффитса):

$$-\frac{dW_e}{dl} > \frac{dW_s}{dl}, \quad (6.1)$$

где W_e – упругая энергия в материале; W_s – полная поверхностная энергия, включая энергию вновь образующейся поверхности разрыва; l – размер (длина) трещины.

Условие (6.1) соответствует конечной стадии разрушения, для иницирования и начала роста микротрещин требуется либо более высокие напряжения, либо какие-либо дополнительные условия (например, флуктуационный разрыв перенапряженных связей в вершине). В теории дислокаций рассматривается несколько механизмов: скопление дислокаций (например, на границах зерен), объединение вакансий и др.

Время до разрыва (долговечность под нагрузкой) определяется скоростью роста трещин на первой (ускоренной) стадии:

$$\frac{dl}{dt} = A_0 \exp(\alpha \sigma_l) \exp(\beta l) = A_0 \exp\left(\frac{\alpha \sigma_0}{1 - l/L}\right) \exp(\beta l), \quad (6.2)$$

где σ – среднее напряжение в материале в процессе роста трещины (например, для детали прямоугольного сечения $\sigma = \sigma_0/(1 - l/L)$); σ_0 – среднее напряжение в материале до начала роста трещины; l – длина трещины; L – размер (ширина) детали; A_0 , α и β – коэффициенты, зависящие от свойств материала и температуры.

Экспоненциальная зависимость (6.2) отражает лавинообразный характер развития трещин: увеличение длины трещины приводит к увеличению напряжения, что в свою очередь увеличивает скорость роста трещины.

Полагая, что при $t = 0$ $l = 0$ и процесс заканчивается разрывом образца (т.е. при $t = x$ $l = L$), на основании уравнения (6.2) можно получить для времени разрушения

$$\tau = \frac{L}{A_0 \alpha \sigma_0} \exp(-\alpha \sigma_0) = \frac{A_1}{\sigma_0} \exp(-\alpha \sigma_0) = A \exp(-\alpha \sigma_0), \quad (6.3)$$

При этом следует помнить, что коэффициент A зависит от напряжения σ_0 .

При сравнительно больших напряжениях и мелких трещинах докритических размеров ($l/L \rightarrow 0$) скорость роста отражает термоактивационный механизм процесса:

$$v_l = \frac{dl}{dt} = v_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma_{\text{лок}}}{RT}\right), \quad (6.4)$$

где $\sigma_{\text{лок}} \approx 2 \frac{\sigma}{n} \sqrt{\frac{l}{r}}$ – истинное локальное напряжение; r – радиус кривизны вершины трещины; n – относительное число эффективно нагруженных связей; U_0 – энергия активации процесса роста трещин, равная энергии разрыва межатомных связей; γ – структурный коэффициент (характеристика чувствительности материала).

Стадия ускоренного роста трещины переходит в стадию быстрого роста, когда перенапряжение в вершине трещины достигает значения теоретической прочности. При этом предельная скорость роста (близкая к скорости звука в материале) и критическая длина трещин

$$v_{\text{пр}} = 0,5 \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}, \quad l_{\text{кр}} \approx \frac{r}{4} \left(\frac{\sigma_{\text{теор}}}{\sigma} \right)^2, \quad (6.5)$$

где E – модуль упругости; ρ – плотность материала; μ – коэффициент Пуассона; $\sigma_{\text{теор}}$ – предел молекулярной прочности.

Долговечность (время разрыва) связано с вероятной длительностью элементарного акта флуктуационного разрыва единичной перенапряженной связи полуэмпирическим соотношением

$$\tau \approx \int_0^{\infty} \frac{1}{v_l} dl = \frac{\tau' [\sigma_{\text{лок}}(l_0)]}{\beta \lambda} = \frac{\tau_0}{\beta \lambda} \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}\right), \quad (6.6)$$

где τ' – среднее время существования отдельной перенапряженной связи в вершине трещины; l_0 – размер исходной субмикроскопической трещины; β – коэффициент, характеризующий самоускорение процесса разрыва; $\lambda \approx r$ – расстояние, на которое увеличивается длина трещины за время τ' (размер области флуктуационного разрыва).

6.1.3 ПРИНЦИП СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Процессы разрушения материалов сводятся, главным образом, к постепенному росту деформаций и развитию трещин, постепенному накоплению локальных дефектов вследствие необратимого характера последовательных единичных нарушений. В случае изменяющегося во времени напряжения разрушение материала произойдет тогда, когда сумма всех дефектов достигнет предельного значения. Если зависимость напряжения от времени дискретна (напряжение в отдельных интервалах времени постоянно) условие разрушения можно записать в виде

$$\sum_{i=0}^n \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i)} = 1. \quad (6.7)$$

Здесь Δt_i – продолжительность i -го периода нагружения; σ_i – напряжение в материале в течение i -го периода нагружения; $\tau(\sigma_i)$ – долговечность материала при напряжении σ_i .

Если напряжение является непрерывной функцией времени, то условие (6.7) приобретает вид

$$\int_0^t \{\tau[\sigma(t)]\}^{-1} dt = 1. \quad (6.8)$$

Условия (6.7) и (6.8) отражают *принцип суммирования (или правило накопления) повреждений*: отдельные локальные повреждения суммируются вплоть до предельного состояния.

Эти условия основаны на предположении, что доля долговечности, расходуемая на любом отрезке времени, не зависит от предыдущего нагружения. Такое предположение справедливо, если на долговечность не оказывают существенного влияния процессы старения. Скорость нагружения существенно влияет на механизм разрушения. При медленном увеличении нагрузки происходит упругая деформация, затем пластическое течение материала и, наконец, разрыв. Кроме того, при этом могут наблюдаться вторичные процессы. При большой скорости нарастания напряжения обычно происходит хрупкое разрушение.

6.1.4 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Многократное приложение нагрузок вызывает разрушение элементов при напряжениях, значительно меньших, чем в случае однократного нагружения. При большом числе циклов напряжения, при которых происходит разрушение материалов, могут быть ниже не только пределов прочности или текучести, но и упругости. Это явление называется *усталостным разрушением*. Механизм малоциклового усталости в основном определяется повторными пластическими деформациями, многоциклового - накоплением рассеянных повреждений в наиболее слабых или наиболее напряженных структурах материала и развитием трещин.

Стойкость материалов против усталостного разрушения является одним из важных факторов, влияющих на надежность и долговечность элементов и систем. Явление усталостного разрушения связано с пластической деформацией материалов, при которой происходит реализация различных механизмов взаимодействия дислокаций, скопление вакансий и зарождение усталостных трещин. В этом сложном процессе большую роль играют адсорбция, диффузия и процессы химического взаимодействия (в первую очередь - коррозия). Процесс усталостного разрушения усложняется при одновременном циклическом нагружении и трении в условиях воздействия внешней газовой или жидкой среды.

Внешним проявлением усталости материалов является возникновение и постепенное распространение при многократных нагрузках характерных трещин на поверхности элемента в местах концентрации напряжений. В зависимости от состояния материала и условий циклического нагружения наблюдаются различные механизмы зарождения и развития трещин.

В своем развитии процесс проходит несколько стадий: сначала в материале накапливаются необратимые изменения, приводящие к возникновению микроскопических трещин (от 50 до 90 % ресурса), затем происходит увеличение и углубление трещин, их распространение по сечению до тех пор, пока ослабление сечения не приводит к разрушению элемента.

Основным критерием, характеризующим сопротивление материала усталостному разрушению, является *предел выносливости (предел усталости)* - наибольшее напряжение, которое может выдержать материал без разрушения при неограниченном числе циклов нагрузки. Для характеристики стойкости материалов против усталости можно также использовать показатель *усталостной долговечности* - число циклов в данных условиях нагружения, при котором происходит разрушение.

Современные представления о возникновении усталостных трещин основываются на теории дислокаций. Основными факторами, определяющими закономерности усталостного разрушения, являются возвратно-поступательные движения дислокаций и их взаимодействие между собой и другими дефектами.

Возникающие при этом эффекты аннигиляции дислокаций, возникновения вакансий, локальное повышение напряжений и температуры способствуют зарождению трещин.

Процесс усталостного разрушения можно разделить на несколько периодов. В первом (инкубационном) происходит накопление пластической деформации и упрочнение материала в результате скопления дислокаций перед препятствиями (в основном в приповерхностных слоях материала). Релаксация локальных напряжений приводит к образованию большого числа вакансий. Второй период характеризуется образованием микротрещин, третий – их развитием до критических размеров, четвертый начинается с момента достижения трещиной критических размеров и заканчивается хрупким разрушением материала.

Процесс усталостного разрушения начинается, как правило, с поверхности материала. Поэтому механическая обработка и различные виды поверхностного упрочнения, при которых происходит изменение шероховатости и напряженного состояния поверхностного слоя, существенно влияют на предел выносливости и другие характеристики. Повышенная усталостная стойкость пластичных материалов в значительной степени зависит от прочности поверхностного слоя, полученной в результате наклепа при механической обработке. Для повышения стойкости твердых и хрупких материалов положительное влияние оказывают остаточные напряжения.

6.1.5 АДСОРБЦИОННОЕ СНИЖЕНИЕ ПРОЧНОСТИ

Процессы разрушения твердых тел существенно зависят от их взаимодействия с окружающей средой (например, долговечность меди и алюминия в вакууме 10^{-5} мм рт.ст. соответственно в 20 и 10 раз больше, чем в обычной атмосфере).

Воздействие почти всех активных сред начинается с адсорбции молекул или ионов на поверхности тела. Влияние адсорбционных процессов обусловлено, главным образом, двумя факторами: *изменением состояния поверхности* твердого тела и *действием поверхностно-активных веществ* (ПАВ), снижающих поверхностную энергию твердого тела.

Многие механические характеристики (пластичность, сопротивление ползучести, усталостная прочность, внутреннее трение) зависят от состояния поверхности тела. Разрушение можно рассматривать как процесс образования новых поверхностей (трещин и разломов), а адсорбция ПАВ, уменьшая энергию, необходимую для образования новых поверхностей, снижает сопротивление разрушению.

Различаются внешний и внутренний адсорбционные эффекты. *Внешний эффект* вызывается адсорбцией ПАВ на внешней поверхности тела, что приводит к снижению предела текучести и коэффициента упрочнения (пластификации). *Внутренний эффект* возникает в результате адсорбции ПАВ на поверхности дефектов внутри твердого тела, вследствие чего снижается прочность и повышается хрупкость.

ПАВ (некоторые органические вещества, жидкие металлы и электролиты) понижают усталостную прочность металлов и могут вызвать преждевременный отказ элементов, подвергающихся длительному воздействию циклических напряжений (адсорбционная усталость, эффект Ребиндера).

Снижение прочности материалов под действием ПАВ связано с наличием на поверхности микротрещин, имевшихся до изначально или возникающих в процессе деформации. Молекулы ПАВ внедряются во все дефекты материала и мигрируют к основанию трещин. В результате создается большое избыточное давление. Когда материал смачивается полностью, оно принимает максимальное значение и может быть очень большим.

6.1.6 КОРРОЗИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

До 30 % изделий, изготовленных из металлов, выбывает из технического использования вследствие коррозионного разрушения. Коррозионные процессы приводят к существенному снижению надежности технических систем, увеличению затрат на ремонт, восстановление и защитные мероприятия.

Коррозионное разрушение материала происходит в результате его химического или электрохимического взаимодействия с жидкой или газообразной

средой. Главной причиной коррозии является термодинамическая неустойчивость материала – коррозионные реакции сопровождаются уменьшением термодинамического потенциала и энергетически выгодны.

Разнообразие условий эксплуатации элементов, большое количество факторов, влияющих на коррозионные процессы, и их возможных сочетаний обуславливают многообразие форм проявления коррозии.

Химическая коррозия включает широкий спектр процессов химического взаимодействия материалов с агрессивными средами различного состава. Наибольшее практическое значение имеют процессы взаимодействия материалов (в первую очередь – металлов и сплавов) с кислородом.

Закономерности *электрохимической коррозии* во многом определяются строением коррозионной среды. Электролитами могут быть вода, водные и неводные растворы солей, кислот и оснований, расплавы солей.

Механизмы химической и электрохимической коррозии являются определяющими закономерностями разрушения поверхности материалов при их взаимодействии с агрессивной средой. В зависимости от условий эксплуатации коррозионное разрушение может протекать либо по одному из механизмов, либо с преобладанием одного из них. Основная сложность количественной оценки коррозионных процессов заключается в их поливариантности и зависимости от большого количества внутренних (состав и структура материала, физические, механические и электрохимические параметры поверхности и т.д.) и внешних факторов (состав, температура, скорость среды, взаимодействие с другими материалами и т.д.). Известно большое количество аналитических, полуэмпирических и эмпирических методов расчета.

6.1.7 ТРЕНИЕ И ИЗНОС МАТЕРИАЛОВ

Износ, возникающий при трении сопряженных поверхностей соприкасающихся элементов (деталей), является наиболее характерным видом повреждения и одной из основных причин отказов большинства механических систем (отказы из-за износа составляют 80 – 90 %, в автомобилях и строительном дорожных машинах – до 95 %). Отказы могут наступать как вследствие износа поверхностей до предельного состояния, так и при значительном или резком изменении коэффициента трения.

Износом называется процесс изменения размеров, формы, массы или состояния поверхности тела вследствие разрушения (изнашивания) его поверхностного слоя при трении, проявляющийся в отделении с поверхности материала и (или) остаточной деформации.

Изнашивание – сложный физико-химический процесс, он может сопровождаться различными поверхностными и объемными явлениями (в частности коррозией).

При контакте и относительном перемещении сопряженных поверхностей в поверхностных слоях возникают различные механические и молекулярные взаимодействия, которые в конечном счете и приводят к разрушению микрообъемов поверхностей, т.е. к износу.

Соответственно *классификация* видов изнашивания базируется на выделении основных факторов, определяющих процесс: *механическое* изнашивание происходит в результате только механического взаимодействия, *молекулярно-механическое* сопровождается межмолекулярным взаимодействием материалов, *коррозионно-механическое* происходит при трении материалов, вступивших в химическое взаимодействие со средой. Разновидности этих процессов характеризуются специфическими явлениями, вызывающими разрушение микрообъемов материала при трении.

Абразивное изнашивание происходит при наличии на трущихся поверхностях абразивных частиц в результате резания и царапания с отделением стружки, причем часто абразивные частицы сами являются продуктами износа – твердыми образованиями структурных составляющих разрушенных микрообъемов материалов. Разновидностью абразивного изнашивания является гидро- и газоабразивное изнашивание, при котором износ происходит в результате воздействия потока твердых частиц в жидкости или газе.

Усталостное изнашивание является следствием циклического взаимодействия микровыступов трущихся поверхностей. Отделение частиц материала может также происходить при механическом взаимодействии в результате наклепа поверхностного слоя, который при этом становится хрупким и разрушается.

Адгезионное изнашивание связано с возникновением в локальных зонах контакта интенсивного молекулярного (адгезионного) взаимодействия, силы которого превосходят прочность связей материала поверхностных слоев с основным материалом.

Усталостное изнашивание является следствием циклического взаимодействия микровыступов трущихся поверхностей. Отделение частиц материала может также происходить при механическом взаимодействии в результате наклепа поверхностного слоя, который при этом становится хрупким и разрушается.

Адгезионное изнашивание связано с возникновением в локальных зонах контакта интенсивного молекулярного (адгезионного) взаимодействия, силы которого превосходят прочность связей материала поверхностных слоев с основным материалом.

Избирательный перенос характеризуется атомарными явлениями в зоне контакта и в результате своеобразных химико-механических процессов при-

водит к образованию на поверхности материалов мягкого и тонкого слоя, обеспечивающего минимальное трение и способствующего равномерному распределению давлений по поверхности трения, образованию практически безызносных пар трения.

Окислительное изнашивание происходит при наличии на поверхности трения защитных (окисных) пленок, образовавшихся в результате взаимодействия материала с кислородом. При этом в первую очередь разрушается, как правило, более хрупкий материал – пленка окислов.

Фреттинг-коррозия происходит при относительных колебательных перемещениях контактирующих поверхностей в результате вибраций или периодических деформаций элементов. Процесс происходит в несколько стадий: сначала происходит упрочнение поверхностей контакта, пластическая деформация выступов, возникновение и разрушение окисных пленок, затем развиваются коррозионно-усталостные процессы и вследствие адсорбции влаги и кислорода формируются коррозионно-активная среда, после этого происходит разрыхление и разрушение поверхностных слоев. Образующиеся при этом в зоне контакта продукты износа могут интенсифицировать процессы разрушения вплоть до абразивного изнашивания.

Количественными показателями износа могут быть *линейный износ* (изменение размера тела в направлении, перпендикулярном поверхности трения), *скорость изнашивания* (изменение линейного износа в единицу времени) и *интенсивность изнашивания* (отношение линейного износа к пути трения).

Закон изнашивания в общем случае должен выражать зависимость линейного износа или скорости изнашивания от силовых и кинематических параметров (в первую очередь давления на поверхности трения и скорости относительного скольжения), от параметров, характеризующих состав, структуру и механические свойства материалов трущейся пары (твердости, предела текучести, модуля упругости и др.), от свойств поверхностного слоя (шероховатости, жесткости, напряженного состояния и др.), от вида трения, от вида и свойств покрытий и смазок, от внешних условий (температуры, вибраций, давления и др.), кроме того, он должен описывать изменения износа во времени.

6.1.8 ЭРОЗИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Процессы эрозии объединяют несколько видов поверхностного разрушения тела под воздействием динамических потоков жидкостей, газов, твердых частиц или электрических разрядов. В большинстве случаев в процессах эрозии происходит интенсивное разрушение материалов с образованием питтингов, каверн и раковин, которое часто приводит к преждевременной потере работоспособности элементов технических систем.

Анализ процессов эрозии затрудняется многообразием физических механизмов, вызывающих поверхностное разрушение материалов и их сочетаний, а также большим количеством факторов, оказывающих влияние на характер и формы проявления процессов.

Кроме того, эрозионному разрушению материалов часто сопутствуют процессы, косвенно связанные с ним и оказывающие на его кинетику существенное влияние (например, газовая эрозия часто сопровождается процессами химической коррозии, термической усталости, цементации, азотирования и др.).

Процессы эрозии редко протекают по одному механизму и это значительно усложняет картину разрушения. Однако в каждом случае можно выделить основной механизм, лимитирующий надежность элемента.

Механохимическая эрозия проявляется, когда энергия потока жидкости, газа или твердых частиц недостаточна для пластической деформации, структурных или фазовых изменений материала на глубине нескольких микрон и разрушение происходит в поверхностных субмикроскопических слоях в результате разрушения и уноса пленок вторичных структур. Интенсивность процесса незначительна по сравнению с другими видами эрозии, однако при неправильном выборе материалов или условий эксплуатации механохимическая эрозия может привести к преждевременному выходу элемента из строя. Кроме того, скорость эрозии может быть различной на различных участках поверхности, что часто приводит к возникновению волн, локальных углублений и раковин и может отрицательно сказаться на надежности.

Микроударная эрозия наблюдается, когда поверхность материала в потоке газа, жидкости или твердых частиц подвергается локальным ударам, энергия которых достаточна для пластической деформации, структурных или фазовых превращений. Микроударное воздействие является сложным видом нагружения: ударным, многократным, локальным, неравномерным и микрообъемным. Основной его особенностью является локализация отдельного деформационного акта в объеме, соизмеримом со структурными составляющими материала (например, зернами). При этом возрастает роль границ структурных составляющих в процессе зарождения и развития микротрещин.

Кроме того, специфика воздействия приводит к проявлению необычных свойств материала (например, мартенсит при микроударном воздействии проявляет высокую пластичность). Частным случаем микроударной эрозии является эрозия при кавитации.

Термическая эрозия является основным механизмом при взаимодействии материала с раскаленным газовым потоком. Разрушение происходит в результате того, что поверхность материала, нагретая до высокой температуры (иногда выше температуры плавления), слабо сопротивляется динамическому воздействию газового потока. При этом связи между частицами материала

ослабевают, и они уносятся газовым потоком. Образовавшиеся при этом каверны в дальнейшем усиливают эрозионный процесс.

В некоторых случаях процесс термической эрозии может усиливаться сопутствующими эффектами (пиролизом, испарением, сублимацией и др.).

В зависимости от вида материала и условий процесса в каждом случае может преобладать один из описанных механизмов.

6.1.9 ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОВОГО РАЗРУШЕНИЯ

Тепловая устойчивость твердых тел, как и механическая прочность, определяется энергией межмолекулярной или межатомной связи (энергией кристаллической решетки). Большая величина энергии связи определяет способность материала к образованию кристаллических решеток с высокой теплоустойчивостью, механической и электрической прочностью.

В зависимости от скорости нагрева материал плавится или испаряется: медленное нагревание сопровождается плавлением и испарением расплава, быстрое нагревание вызывает испарение (сублимацию) твердого тела.

6.1.10 ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Пробой диэлектрика происходит при наложении электрического поля, напряженность которого превышает критическое значение - *пробивную напряженность*, характеризующую электрическую прочность материала. Для твердых диэлектриков характерны две формы пробоя: пробой, вызванный электрическим разрядом (*чисто электрический пробой*), и *тепловой пробой*. В области низких температур при чисто электрическом пробое, пробивная напряженность не зависит от температуры. В области более высоких температур наблюдается тепловой пробой и пробивная напряженность зависит от температуры и длительности воздействия (чем меньше время воздействия, тем выше пробивная напряженность).

Полупроводники, как и диэлектрики, обладают определенной электрической прочностью, которая характеризуется пробивной напряженностью электрического поля. Различия между диэлектриками и полупроводниками заключаются, главным образом, в ширине полосы запрещенных энергий между валентной зоной и зоной проводимости: в диэлектриках она больше 3 эВ, в полупроводниках – меньше 2 эВ.

Потеря электрической прочности и пробой полупроводников под действием электрического поля в зависимости от условий может быть вызван различными физическими процессами. В связи с этим различаются чисто электрический, тепловой и комбинированный механизмы пробоя.

6.1.11 ПРОЦЕССЫ СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Старением материалов называются процессы изменения их свойств во времени в условиях длительной эксплуатации или хранения. Обычно старение обусловлено недостаточно стабильным или неравновесным состоянием материала и его постепенным переходом в стабильное или равновесное состояние. Этот переход может быть связан со структурными превращениями или релаксационными процессами.

Любой процесс старения возникает и развивается только при определенных внешних условиях. Для оценки возможных изменений материалов необходимо установить условия возникновения и область существования процесса старения.

В общем случае при старении может происходить как ухудшение, так и улучшение свойств материалов, часто улучшение одних свойств сопровождается ухудшением других. Иногда для улучшения или стабилизации некоторых характеристик материалов применяются методы искусственного старения.

6.1.11.1 Старение металлов и сплавов

Металлические сплавы могут представлять собой химические соединения, твердые растворы внедрения или замещения и металлические соединения, являющиеся промежуточной фазой между химическими соединениями и твердыми растворами.

Процессы старения в металлах и сплавах могут быть связаны с аллотропическим или мартенситным превращением, упорядочением и разупорядочением твердых растворов, распадом мартенситной структуры, растворением в твердом состоянии, распадом пересыщенных твердых растворов, образованием твердого раствора из эвтектоидной смеси и эвтектоидным распадом. Все виды превращений могут быть разделены на две большие группы: процессы, связанные с изменением кристаллической структуры (без изменения химического состава), и процессы, связанные с образованием фаз и изменением химического состава. Некоторые процессы могут происходить в широком диапазоне температур, другие - только при определенных (иногда очень высоких или очень низких) температурах.

6.1.11.2 Старение полимерных материалов

Физико-механические свойства полимеров (предел прочности, сопротивление пластической деформации, температура размягчения, эластичность и др.) определяются их химическим составом и структурой (распределением областей кристаллического и аморфного строения, длиной, формой и подвижностью цепей, природой и величиной сил, действующих между цепями, степенью «сшивания» цепей и т.д.).

Старение технических полимерных материалов обусловлено, в основном, процессами, приводящими к деструкции полимеров, т.е. распаду основных цепей макромолекул на осколки более простого строения, или к изменению строения макромолекул и взаимодействия между ними.

Кроме деструкции, причиной изменения свойств полимеров могут быть процессы структурирования (образования добавочных внутренних связей), выделения пластификатора и др.

Процессы деструкции могут происходить под влиянием физических (тепло, свет и т.д.) или химических (кислород, вода и т.д.) факторов. Наиболее важными факторами являются тепло, свет и кислород. Соответственно наиболее распространенными видами деструкции являются термическая, фотохимическая и окислительная, а также термоокислительная и фотохимически активированная окислительная деструкция.

Стабильность и стойкость полимеров к процессам старения зависит от энергии связи между атомами, регулярности строения и легкости образования связей.

Возникновение поперечных связей и перегруппировка в более стабильные регулярные структуры замедляет разложение. Нарушение регулярности и примеси ослабляют стабильность соединений (обычно деструкция начинается именно с участков с неоднородной структурой).

При старении могут изменяться не только химический состав, но и структура и параметры взаимодействия молекул, определяющие физико-механические свойства. Уменьшение длины цепей и молекулярной массы ухудшает многие механические свойства: снижает прочность при растяжении и стойкость к истиранию, увеличивает хрупкость и т.д.

В результате процессов структурирования (сшивания цепей и возникновения трехмерной структуры) уменьшается растворимость, повышается твердость, прочность и хрупкость, снижается пластичность и эластичность.

Наряду со старением, обусловленным процессами термоокислительной деструкции, ухудшение диэлектрических свойств полимерных изоляционных материалов в значительной степени определяется *электрическим старением* под влиянием приложенного напряжения. В этих процессах существенную роль играет ионизация воздуха в воздушных включениях диэлектриков при достаточно высоком напряжении.

6.1.11.3 Старение полупроводниковых материалов и приборов

Возникновение отказов и ухудшение работоспособности полупроводниковых приборов часто связаны с их старением, которое проявляется в деградации, дрейфе параметров и характеристик (увеличении обратного тока диодов и неуправляемых обратных токов коллекторного и эмиттерного переходов транзисторов, дрейфе коэффициентов передачи тока транзисторов, снижении пробивных напряжений, уменьшении пикового тока туннельных диодов и

т.д.). В общем случае процессы старения приводят к изменению вольтамперной характеристики p - n -перехода прибора.

Ухудшение параметров полупроводниковых приборов обусловлено физико-химическими процессами, интенсивность которых определяется чувствительностью полупроводников к внешним условиям и составу окружающей среды, зависимостью их параметров от примесей, неоднородностей и дефектов структуры полупроводниковых материалов.

Процессы, вызывающие изменение параметров и характеристик приборов, в значительной степени зависят от внешних условий и режимов работы: температуры, влажности, давления и состава окружающей среды, механических нагрузок, рассеиваемой мощности, электрической нагрузки и других факторов.

Сильная зависимость параметров полупроводниковых приборов от температуры и рассеиваемой мощности – их принципиальная особенность, связанная с физическими свойствами полупроводниковых материалов. Стабильность характеристик и надежность полупроводниковых приборов в первую очередь зависит от времени жизни неравновесных носителей заряда, концентрации в переходе донорных и акцепторных примесей, ширины, площади сечения и контактного потенциала перехода.

Определяющее влияние на величину и стабильность электрических параметров приборов могут оказывать процессы на поверхности полупроводниковых кристаллов.

Поверхность кристалла нарушает правильность и периодичность кристаллической решетки, атомы, расположенные у поверхности, имеют незаполненные связи. Такие атомы могут вести себя как акцепторы, т.е. способны принимать дополнительные электроны в свою внешнюю оболочку, что и определяет их повышенную активность. Кроме того, состояние и свойства поверхности полупроводниковых материалов зависят от адсорбированных атомов или молекул (например, кислорода), скоплений дефектов, возникших при обработке, и свойств пленки соединений полупроводниковых элементов с другими элементами.

Специфической особенностью полупроводниковых материалов является чрезвычайно высокая чувствительность к примесям и дефектам структуры. Однородность состава и структуры полупроводника определяется, прежде всего, качеством исходного материала и технологией изготовления полупроводникового прибора. Однако некоторые дефекты могут возникать при определенных условиях и в процессе эксплуатации или хранения, генерацию большого количества дефектов (дислокаций) могут вызывать диффузионные процессы, при определенных условиях в полупроводниках могут протекать процессы выделения примесей из пересыщенного раствора в виде инородных высокодисперсных частиц.

6.2 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Обеспечение требуемого уровня надежности требует проведения широкого комплекса мероприятий, выполняемых на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации:

- ✓ на стадии проектирования (*конструкционные методы*) – выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности, оптимальных конструктивных схем и материалов, расчет и прогнозирование ресурса на основе информации о материалах, нагрузках и воздействиях;
- ✓ на стадии изготовления (*технологические методы*) – контроль качества материалов и изделий, организация рациональных технологических процессов, применение упрочняющих технологий, контрольные испытания;
- ✓ на стадии эксплуатации (эксплуатационные методы) – снижение уровня нагрузок и воздействий, диагностика, прогнозирование индивидуального остаточного ресурса для обеспечения эксплуатации по техническому состоянию, выбор оптимальной системы технического обслуживания и ремонтов, повышение качества восстановления.

Многообразие объектов по назначению, принципу действия, конструкционным особенностям, протекающим процессам, условиям и режимам эксплуатации не позволяет свести рекомендации по повышению и обеспечению их надежности к ограниченному перечню методов и приемов.

В каждом конкретном случае для этих целей требуется индивидуальный анализ и глубокое изучение закономерностей протекающих процессов.

В общем виде основные *методы повышения надежности* элементов технических систем могут быть сведены в следующие основные группы:

- ✓ разработка или выбор высоконадежных деталей, узлов, комплектующих и других составных частей элементов и систем;
- ✓ рациональный выбор и использование конструкционных материалов и технологий упрочнения;
- ✓ стандартизация и унификация деталей, узлов и единиц оборудования;
- ✓ оптимизация режимов функционирования элементов;
- ✓ защита элементов от перегрузок;
- ✓ защита элементов от неблагоприятного воздействия перерабатываемых веществ и окружающей среды;
- ✓ создание распределенных автоматизированных систем управления и контроля;
- ✓ разработка и проведение научно обоснованной системы технического обслуживания и ремонта;
- ✓ автоматизация и роботомеханизация процессов изготовления деталей, узлов и единиц оборудования;
- ✓ контроль качества изготовления;
- ✓ контроль качества сборки, монтажа, ремонта и т.д.

Эффект увеличения надежности технической системы, достигаемый повышением надежности элементов, тем значительнее, чем сложнее система и чем больше в ней элементов. Однако чаще всего более надежные элементы имеют большие габариты и массу, более сложную собственную структуру и, как правило, более высокую стоимость.

Кроме того, осуществление некоторых методов повышения надежности элементов требует проведения достаточно сложных конструктивных, технологических, эксплуатационных и организационных мероприятий. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо соотнести полезный эффект от повышения надежности элемента с затратами на ее осуществление.

Часто использование методов повышения надежности элементов не дает значительного эффекта или неосуществимо по различным причинам. В этих случаях повышение надежности технической системы возможно только в результате изменения ее структурной схемы.