



Показатель надежности — величина, характеризующая одно из свойств (единичный показатель) или несколько свойств (комплексный показатель).

Надежность — свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

Работоспособность — состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

Отказ — полная или частичная утрата изделием работоспособности.

Неисправность — состояние изделия, при котором оно в данный момент времени не соответствует хотя бы одному из требований технической документации.

Безотказность — свойство изделия сохранять работоспособность непрерывно в течение некоторого времени, проявляющееся, в зависимости от назначения объекта, как в режиме его работы, так и в режиме ожидания работы.

Долговечность — свойство изделия сохранять работоспособность до перехода в предельное состояние с возможными перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Характеризует продолжительность работы объекта по суммарной наработке, прерываемой периодами для восстановления его работоспособности в плановых и внеплановых ремонтах и техническом обслуживании.

Ремонтпригодность — свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, к восстановлению работоспособности и исправности путем технического обслуживания и ремонта.

В указанных определениях использованы термины: отказ, предельное состояние, наработка.

Предельное состояние — состояние изделия, при достижении которого его дальнейшее применение по назначению недопустимо или невозможно.

Нарботка — продолжительность или объем работы изделия в течение рассматриваемого периода.

Рассмотрим критерии состояния изделия, базирующиеся на выполнении (невыполнении) требований НТД (нормативно-технической документации).

Критерий исправного состояния (состояния, при котором он удовлетворяет всем требованиям НТД) — установленные НТД параметры технической характеристики, внешнего вида, эргономики, дизайна и пр.

Критерий неисправного состояния (состояния изделия, при котором он не удовлетворяет требованиям НТД) — выход за установленные пределы хотя бы одного параметра при сохранении изделием работоспособности полностью или частично в заданных или щадящих режимах применения, оговоренных НТД.

Критерием неработоспособного состояния изделия является выход за пределы установленного в НТД значения хотя бы одного параметра технической характеристики при невозможности дальнейшего применения изделия без устранения причин отказа.

Критерием предельного состояния изделия является такое его неработоспособное состояние, при котором по установленным в НТД признакам фиксируется факт недопустимости его дальнейшего применения по назначению и необходимости его замены или капитального ремонта.

Остановимся также на важнейших понятиях — ресурс, срок службы, срок сохраняемости.

Ресурс — наработка изделия от начала его применения до наступления его предельного состояния, оговоренного в технической документации.

Гамма-процентный ресурс — ресурс, который имеет и превышает в среднем обусловленное число (γ) процентов изделий данного типа.

Назначенный ресурс — наработка изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния изделия.

Гарантийная наработка — наработка изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнение определенных требований к изделию, при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования.

Наработка на отказ — среднее значение наработки ремонтируемого изделия между отказами.

Коэффициент технического использования — отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, вызванных техническим обслуживанием и ремонтами за тот же период эксплуатации.

Коэффициент готовности — вероятность того, что изделие будет работоспособно в произвольно выбранный момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации изделия от начала его применения до наступления предельного состояния.

Срок сохраняемости — календарная продолжительность хранения и (или) транспортировки изделия в заданных условиях, в течение и после которых сохраняется исправность.

Если изделие допускает возможность проведения ремонтов или технического обслуживания, предусмотренных в НТД, то оно называется *ремонтируемым изделием*. Ремонт предусматривает выполнение операций по восстановлению работоспособности изделия. Затраты времени на проведение таких операций называются *оперативным временем восстановления*.

Оперативная продолжительность восстановления — время проведения операций по восстановлению работоспособности изделия при выполнении работ несколькими исполнителями (в отличие от оперативного времени восстановления, которое определяется для каждого исполнителя).

В качестве характеристик при проведении работ по восстановлению применяются оперативная трудоемкость и оперативная стоимость исполнения.

Остальные понятия и термины будут вводиться по мере необходимости при изложении материала.

В зарубежной технической литературе применяются в основном аналогичные термины, хотя и несколько отличающиеся по содержанию [36], [66], [71], [75].

Долговечность деталей машин главным образом определяется их прочностью, жесткостью и износостойкостью. К числу критериев работоспособности относятся также вибростойкость и теплостойкость. Эти характеристики подробно рассмотрены в капитальном труде Д. Н. Решетова [68].

1.2. ПРИЧИНЫ ПОТЕРИ МАШИНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

В процессе эксплуатации на машину действуют различные виды энергии, что может привести к изменению параметров отдельных элементов, механизмов, узлов и машины в целом. При этом имеются 3 основных источника воздействия:

- внутренние источники энергии, связанные с рабочими процессами в машине, с работой отдельных механизмов;
- потенциальная энергия, накопленная в материалах и деталях в процессе изготовления (технологическая наследственность);
- действие энергии окружающей среды, включая человека — оператора и ремонтника.

При работе машины различаются следующие основные виды энергии, влияющие на работоспособность машины.

Механическая энергия передается всеми звеньями от источника движения к исполнительным органам, воздействует в виде динамических нагрузок, а также от взаимодействия исполнительных органов с окружающей средой.

Механическая энергия проявляется вследствие перераспределения остаточных напряжений и деформаций или структурных изменений после термической обработки без внешних воздействий.

Тепловая энергия проявляется при осуществлении рабочих процессов (пластической деформации, резания, перемешивания рабочего тела и др.), а также при колебаниях температуры окружающей среды; при работе тепловых двигателей, электро-, гидро-, пневмоустановок.

Химическая энергия — наличие активных и агрессивных сред (морской транспорт, установки химической технологии и пр.); процессы окисления во влажном воздухе;

Электромагнитная энергия воздействует со стороны рабочих процессов (разнообразные электротехнологии) или со стороны окружающей среды.

Ядерная (атомная) энергия, ионизирующие и космические излучения характеризуют энергетические установки, установки и конструкции, работающие в условиях космоса.

Биологические факторы — часть микроорганизмов в тропических странах, воздействующая не только на некоторые виды полимеров и пластмасс, но и на металлы.

Различные виды энергии, воздействуя на машину, вызывают в ее деталях и узлах процессы, изменяющие начальные параметры изделия. Это, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных параметров, регламентированных НТД, что может привести к отказу. Упрощенно взаимосвязь процессов изображается схемой (рис. 1.1).

Отметим, что процессы, приводящие к изменениям начальных параметров, происходят не только в материалах изделий, но и в смазке, рабочих теле-, гидро-, пневмоприводах, топливе и пр.

Рассмотрим некоторые примеры. Механическая энергия в узлах трения приводит к износу трибосопряжений, что вызывает потерю точности относительного перемещения исполнительных органов, возникновение ошибок положения при позиционировании, появлению зазоров и обусловленных ими динамических нагрузок [10]–[14], [25], [28], [37].

Химическая энергия вызывает процессы коррозии в резервуарах, трубопроводах, уплотнениях, что при опреде-



Рис. 1.1

Схема, отражающая взаимосвязь процессов, приводящих к отказу

ленных условиях может привести к их разрушению со всеми тяжелыми последствиями.

Указанные процессы могут происходить совместно, что в ряде случаев способствует их интенсификации (например, сочетание высокочастотных колебаний с температурным воздействием и химических факторов может вызывать появление и ускоренное развитие трещин в конструкциях летательных аппаратов и пр.).

Процессы, происходящие в машинах, можно разделить на классы по ряду признаков.

Прежде всего, отметим так называемые обратимые процессы, причем не с точки зрения термодинамики, когда количество произведенной и затраченной работы при любом повторении цикла остается неизменным. В теории надежности под *обратимыми* понимают процессы, временно изменяющие состояние элементов, деталей или узлов в некоторых допустимых пределах без проявления тенденции к ухудшению состояния. Например, упругое погружение деталей. Как и в термодинамике, все реальные процессы являются необратимыми, поскольку не существует материалов с идеальными характеристиками. Практически даже регламентированные воздействия со временем приводят к прогрессивному ухудшению технических характеристик машины.

По продолжительности различают (естественно, условно) медленные процессы, процессы средней скорости и быстротекущие процессы.

Медленные процессы, протекающие во время работы машины практически за весь срок службы и отличающиеся продолжительностью, — процессы трения, перераспределения внутренних напряжений, явления некритической ползучести и пр. Эти процессы влияют на точность, интенсивность потерь и другие параметры машины и устраняются (или компенсируются) при ремонтах и техническом обслуживании машин.

Процессы средней скорости связаны с периодами непрерывной работы в машинах с циклическим режимом работы. К ним относятся как обратимые, так и необратимые процессы, например износ режущего инструмента,

процессы тепловых деформаций вследствие колебаний температуры и пр.

Быстропротекающие процессы имеют малую продолжительность, обычно на порядок (или несколько порядков) меньшую, чем продолжительность цикла работы машины. К таким процессам относятся так называемые ударные процессы, обусловленные рабочим режимом, нарушениями условий неразрывности контакта в кинематических парах с зазорами и пр. [8], [11], [14].

Указанные выше процессы, приводящие к необратимым изменениям свойств и параметров элементов и деталей, вызывают повреждения, которые могут приводить к отказам.

К *допустимым повреждениям* относятся повреждения, возникающие в режимах нормальной эксплуатации, не приводящие к потере работоспособности в расчетный срок службы. Отметим в качестве примеров накопление усталостных повреждений, медленно текущий износ сопряжений базовых деталей и др.

К *недопустимым повреждениям* относятся повреждения, приводящие к потере работоспособности — к отказам: поломки деталей, заедание во фрикционных узлах сопряжений, потеря точности относительного перемещения исполнительных органов и пр.

Важным классификационным признаком является основанный на оценке последствий, к которым может привести отказ.

Последствия отказа — катастрофические: проявляются в виде аварии, катастрофы или невыполнения ответственного задания. Допустимой вероятностью безотказной работы является $P(t) \rightarrow 1$. Объекты: летательные аппараты, военная техника, некоторые машины химического производства (использующие токсичные, агрессивные материалы), установки радиационной технологии, атомная энергетика, некоторые виды медицинского обслуживания.

Последствия отказа связаны со *значительным экономическим ущербом:* характеризуются повышенными простоями в дорогостоящем ремонте (например, энергетические

установки значительной мощности), работой на пониженных режимах и на режимах с ухудшенными параметрами.

Ущерб считается значительным. Тогда допустимая вероятность безотказной работы $P(t) \geq 0,99$.

При незначительном ущербе принимается $P(t) \geq 0,9$.

К данному классу относится энергетическое, технологическое оборудование, установки непрерывных транспортных систем, сельскохозяйственная техника и др.

Последствия отказа — незначительные (затраты на ремонт в пределах нормы), причем $P(t) < 0,9$.

Ряд процессов в машинах может привести к отказам, которые не связаны с разрушением отдельных деталей или сопряжений и кинематических пар, к ухудшению характеристик и выходу их за пределы, регламентированные НТД. Основными параметрами, определяющими работоспособность машины в зависимости от ее функционального назначения, являются качество выпускаемой продукции, производительность, безопасность обслуживания. Критерий качества зависит от типа машины и может содержать много компонентов. Например, для металлорежущих станков это — размерная точность, свойства поверхностного слоя (микро- и макрогеометрия), производительность; для энергетических машин — мощность, стабильность частоты вращения, КПД и т. д.

Поскольку в современных машинах надежность работы определяется прежде всего изменением выходных параметров под действием *старения* (необратимых изменений свойств материала изделия в результате действия различных факторов), то говорят о *параметрической надежности* изделий. Параметрическую надежность сложных машин или машинных комплексов можно рассматривать с позиции теории информации. Каждый элемент машины можно рассматривать как звено, передающее или преобразующее информацию, а реализацию рабочего процесса — как систему передачи информации от входа к выходу. Что считать «входом» и «выходом», конкретизируется применительно к каждой машине в соответствии с ее функциональным назначением. Возникновение различных необратимых процессов, имеющих, вообще говоря,

случайный характер, приводит к искажению и потере информации. В результате сигнал выхода значительно искажается. Недопустимое искажение выходного сигнала адекватно возникновению параметрического отказа. Выход параметров узла, машины в целом означает необходимость остановки машины, ее регулирования или ремонта.

1.3. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Надежность машин определяется работоспособностью ее узлов и деталей. Обеспечить требуемый уровень надежности создаваемых машин можно только на основе знания физической природы отказов их деталей.

1.3.1. Причины выхода из строя деталей

В практике эксплуатации машин и оборудования встречаются самые разнообразные случаи разрушения деталей. Чтобы научиться проектировать и изготавливать долговечные детали машин, необходимо знать основные разновидности разрушения материалов при их взаимодействии с твердыми, жидкими и газообразными телами.

Наблюдение за износом и повреждениями деталей машин в эксплуатации позволяют выделить 5 основных видов разрушения материалов деталей, которые имеют свои подвиды:

- 1) деформация и изломы (хрупкий излом, вязкий излом, остаточная деформация, усталостный излом, контактные усталостные повреждения);
- 2) механический износ (истирание металлических пар трения, абразивный износ, питтингование);
- 3) эрозионно-кавитационные повреждения (жидкостная эрозия, кавитация, газовая эрозия);
- 4) коррозионные повреждения (атмосферная коррозия, коррозия в электролитах, газовая коррозия);

5) коррозионно-механические повреждения (коррозионная усталость, коррозионное растрескивание, коррозия при трении).

Рассмотрим некоторые характерные черты основных разновидностей разрушения деталей машин.

Деформация и изломы возникают при чрезмерном увеличении напряжений в материале детали, превосходящих предел текучести или предел прочности. Остаточная деформация приводит к изменению размеров и конфигурации детали либо к аварийному разделению детали на части (излом) с полной утратой работоспособности. В зависимости от свойств материала и характера приложения нагрузки изломы могут быть вязкими или хрупкими.

Механический износ проявляется в результате взаимодействия трущихся пар. В зависимости от природы трущихся тел и условий их взаимодействия различают износ при истирании металлических пар или при трении качения или скольжения и абразивный износ.

Коррозия. Обязательным условием для возникновения коррозии металла является наличие контакта между деталью и коррозионной средой. По характеру коррозионных сред коррозия металлов разделяется на атмосферную, газовую и коррозию в электролитах.

Коррозионно-механические повреждения возникают при одновременном действии коррозии и механических факторов (деформаций, напряжений, истираний). В зависимости от условий механических воздействий различают повреждения металла при коррозионной усталости, коррозионном растрескивании, а также при трении.

Кавитационно-эрозионные повреждения образуются при взаимодействии с жидкостью или газом, которые с большой скоростью омывают металлическую поверхность. Различают газовую, жидкостную эрозию и кавитацию.

При высоких температурах наблюдается явление ползучести, которое заключается в том, что металл медленно и непрерывно пластически деформируется под действием постоянных нагрузок. Величина напряжения, вызывающего разрушения при повышенной температуре, зависит от длительности приложения нагрузки. Прочность материала при

высокой температуре характеризуется длительной прочностью, определяемой напряжением, вызывающим разрушение при данной длительности нагружения и данной температуре.

Указанная классификация, безусловно, не охватывает всех разновидностей разрушения деталей машин в эксплуатации, поскольку отдельные виды разрушения материала не проявляются в «чистом виде», в результате чего могут возникать промежуточные механизмы повреждений.

Одной из наиболее распространенных причин разрушения деталей, возникающего при действии циклических напряжений, является *усталостное разрушение* металла. Ему обычно предшествует появление усталостной трещины, чаще всего в месте концентрации напряжений. Развитие трещин приводит к уменьшению сечения. Статическая прочность детали при этом снижается, и она разрушается. Разрушенное сечение имеет 2 характерные зоны: зона со следами пластической деформации, мелкозернистой структурой и зона с крупнозернистой структурой. Величина и расположение зон зависят от характера и интенсивности нагружения.

1.3.2.

Усталостные разрушения материалов

Поломки деталей машин в результате недостаточной выносливости (усталости) происходят при напряжениях значительно меньших, чем величина пределов прочности и текучести металла. Усталостные разрушения происходят в условиях многократно повторяющихся нагрузок, которые изменяются во времени с определенной закономерностью между двумя предельными значениями. При синусоидальном изменении напряжений время, в течение которого напряжение дважды принимает одно из предельных значений, составляет период нагружения T . Изменение напряжения за период T называют *циклом напряжений*.

Цикл напряжений характеризуется следующими значениями:

- σ_{\max} — наибольшее напряжение цикла;
- σ_{\min} — наименьшее напряжение цикла;

- T — период, или длительность, 1 цикла;
- $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ — амплитуда напряжения;
- $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ — среднее напряжение цикла.

Интервал напряжений цикла равен алгебраической разности наибольшего и наименьшего напряжений. В зависимости от величины среднего напряжения различают симметричный и асимметричный циклы.

При симметричном цикле среднее напряжение $\sigma_m = 0$, т. е. переменное напряжение изменяется между двумя противоположными по знаку и равными по величине предельными значениями $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$.

При асимметричном цикле среднее напряжение отлично от нуля. Асимметричный знакопостоянный цикл, при котором напряжения изменяются от нуля до максимального значения и, таким образом, среднее напряжение цикла равно амплитуде напряжения, т. е. $\sigma_m = \sigma_a$, называется *пульсирующим циклом*. Для обозначения предела усталости к символу σ прибавляют индекс. При симметричном цикле предел усталости обозначается через σ_{-1} , при пульсирующем — через σ_0 .

Графическая зависимость между количеством повторных нагрузок и напряжением, которое выдерживает металл до разрушения, изображается известной кривой Велера (рис. 1.2). Эта кривая называется *кривой выносливости*. Следовательно, кривая выносливости или усталостной прочности, показывает способность металла сопротивляться циклическим напряжениям.

Хрупкий излом деталей возможен при больших ударных нагрузках, работе в условиях низких температур, при наличии дефектов термообработки или местных дефектов

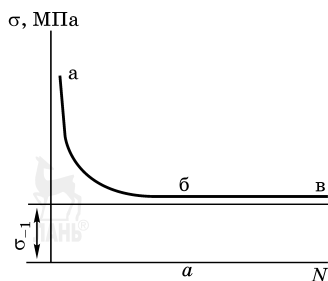


Рис. 1.2

Кривая выносливости (Велера)

в материале, при большой концентрации напряжений. Хрупкий излом является причиной выхода из строя сварных соединений, чугунных отливок, фасонных деталей с объемной термообработкой до высокой твердости.

При перегрузках, длительном действии напряжений, высокой температуре в деталях из вязких материалов возникают *пластические деформации*. Вследствие пластической деформации происходит изменение геометрической формы деталей (искривление осей и валов, осадка пружин, вмятины на поверхностях качения бандажей, рельсах, дорожках качения шариков подшипников, шпонках, шлицах и др.).

Ползучесть — медленная и непрерывная пластическая деформация деталей возникает при напряжениях выше предела упругости, нагреве до температур рекристаллизации. Этому виду разрушения подвергаются лопатки, диски паровых и газовых турбин, трубы паропроводов, нефтеперегонная аппаратура и др.

Наиболее характерным видом постепенного разрушения деталей машин является *износ*. В результате износа изменяются размеры и форма, состояние поверхности деталей, что приводит к снижению точности механизмов, прочности деталей, увеличению динамических нагрузок и, наконец, утрате работоспособности всей машины.

Износ происходит при трении сопряженных деталей, его интенсивность зависит от условий взаимодействия трущихся пар. Это взаимодействие имеет молекулярно-механическую природу. Молекулярное взаимодействие обусловлено взаимным притяжением твердых тел, механическое заключается во взаимном внедрении частиц сжимаемых поверхностей. Различают следующие виды фрикционных контактов и процессов, приводящих к разрушению поверхностей трения [32], [38], [43], [45], [50], [61]:

- микрорезание — срез материала внедрившейся частицей;
- пластическое оттеснение материала;
- упругое оттеснение материала;
- схватывание и оттеснение пленок, покрывающих поверхности тел трения;

- схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием материала.

Процесс разрушения металлов вследствие химического и электрохимического взаимодействия с внешней средой называется *коррозией*. В зависимости от вида среды различают атмосферную, газовую коррозию и коррозию в электролитах. Наиболее интенсивно развивается коррозия металлов в электролитах. Изменение формы и размеров деталей вследствие коррозии снижает их работоспособность, уменьшает прочность и выносливость при переменных напряжениях.

В машиностроении используются многие неметаллические материалы (пластмассы, резина и др.), детали из которых разрушаются из-за старения — изменения физико-механических свойств под действием атмосферных условий.

В результате приложения нагрузки происходит деформация материала, сопровождающаяся изменением формы и размеров детали. Различают упругие деформации, исчезающие после снятия нагрузки, и пластические, остающиеся после снятия нагрузки. Изломом называют полное разрушение материала детали, приводящее к ее расчленению (при растяжении, сжатии, изгибе, кручении или сложном напряженном состоянии). Изломы разделяют по характеру нагружения (статический, усталостный) и по особенностям строения (хрупкий, вязкий).

Характер приложения нагрузки и, как следствие, механизм разрушения могут быть самыми разнообразными. При кратковременной однократной нагрузке возникают статические или динамические изломы. Эти изломы могут иметь различное строение — в зависимости от скорости нагружения и исходной структуры материала. Под вязким изломом понимают излом, который происходит при наличии микропластической деформации [20], [31], [34], [67].

Детали с повышенным пределом прочности (например, закаленные болты) или с поверхностным упрочнением, находящиеся под статической нагрузкой, через некоторое время после первоначального нагружения часто разрушаются, несмотря на сравнительно низкие значения действующих

напряжений. Здесь имеет место так называемое замедленное разрушение, причины которого заключаются в неравномерном развитии пластической деформации в микроструктуре стали.

Поверхность излома при замедленном разрушении имеет макрочрупкий характер и располагается перпендикулярно направлению максимальных растягивающих напряжений. Факторами, увеличивающими вероятность замедленного разрушения, являются дефекты конструкции монтажа, некачественная термическая обработка, наличие концентраторов напряжений, наводороживание в процессе нанесения гальванических покрытий и др. Подобные изломы можно наблюдать при замедленном разрушении болтов в эксплуатации.

Длительное действие нагрузки при повышенной температуре материала детали обычно вызывает малопластичные изломы. При высоких температурах поверхность излома грубозернистая с крупными неровностями. Цвет поверхности темный, так как она покрыта окисной пленкой. Вблизи излома обычно наблюдается растрескивание металла.

Изломы при однократном или постоянном действии нагрузки в практике наблюдаются сравнительно редко. Чаще встречаются так называемые усталостные изломы. Около 80% поломок деталей быстроходных машин имеют усталостный характер.

Явление разрушения материала под действием переменных напряжений в течение некоторого срока службы называется *усталостью*. Способность материала сопротивляться усталостному разрушению называется *выносливостью* (циклической прочностью).

1.3.3.

Теории усталостного разрушения

В задачу данного учебника не входит подробное рассмотрение всех существующих теорий усталостного разрушения. Тем не менее, представляется целесообразным кратко изложить сущность наиболее интересных из этих теорий. Это позволит более глубоко понимать влияние упрочнения

металлических поверхностей на повышение усталостной прочности деталей машин, а следовательно, на повышение надежности работы изделия.

Теория упрочнения

По этой теории процесс усталостного разрушения состоит из 3 стадий. Первая стадия представляет собой развитие скольжения, приводящее к упрочнению. Во второй стадии происходит зарождение усталостной трещины. В третьей стадии образовавшаяся усталостная трещина развивается под влиянием концентрации напряжений. Развитие ее продолжается до тех пор, пока размеры трещины не приведут к образованию напряжения, равного пределу прочности.

К недостаткам усталостной теории упрочнения следует прежде всего отнести то, что эта теория не объясняет разницы в разрушении, наблюдающемся при статических и циклических условиях нагружения. Применение же рентгеновского метода исследования позволило четко обнаружить эту разницу, заключающуюся примерно в следующем. Под действием циклических нагрузок искажения кристаллической решетки локализуются в районе зоны разрушения, а при статических нагрузках указанной локализации не происходит, и искажения решетки распределяются относительно равномерно по всему деформируемому объему металла [20], [25], [31], [34].

В некоторых работах, посвященных вопросам усталости металлов, усталостное разрушение рассматривается с точки зрения влияния роли сопротивления отрыву при разрушении. Однако сама трактовка механизма усталостного разрушения отсутствует [38].

Статистические теории

Экспериментальное определение циклической прочности металлов показало наличие большого разброса опытных данных. Разброс экспериментальных значений наблюдается также и при статических испытаниях. Значительное рассеивание опытных данных привело к необходимости производить их оценку статистическим путем, т. е. методом усреднения свойств отдельных зерен или определения ве-

роятности нахождения зерен с установленными характеристиками прочности. Среди этих теорий несомненный интерес представляет теория Н. Н. Афанасьева, в которой были приняты некоторые упрощающие предположения, однако полученное уравнение кривой растяжения согласуется с опытными данными и на их базе определена вероятность образования усталостных трещин. Эта теория позволила достаточно удовлетворительно описать ряд закономерностей усталостного разрушения [43], [46], [50].

Дислокационные теории

Эти теории для объяснения механизма усталостного разрушения используют дислокационные представления о процессе пластической деформации. При этом принимается, что дислокации образуются в металлах при кристаллизации и вызывают в отожженном монокристалле мозаичную структуру; дислокации возникают и развиваются в результате пластической деформации. Выход дислокации в результате ее движения на поверхность сопровождается появлением на ней линий скольжения; при перемещении дислокаций в результате встречи их с препятствиями образуются вакантные места кристаллической решетки и внедренные атомы. Перемещение дислокаций противоположного знака в параллельных плоскостях скольжения может сопровождаться их аннигилированием и образованием пустот в кристаллической решетке металла.

Следует отметить, что создание более строгой теории усталости требует учета и многих других факторов, влияющих на процесс усталости металлов. К числу этих факторов относится диссоциация дислокаций, атомная диффузия, кривизна плоскости скольжения, взаимодействие между дислокациями, вакансиями и т. д. [82].

Представляет бесспорный интерес и термическая теория усталости. По этой теории образование трещин усталости связывают с возникновением локальных температурных вспышек в зоне полос скольжения под действием циклических напряжений. Локальный нагрев под влиянием циклических напряжений объясняется как результат большого числа скольжений вдоль находящихся на близком рас-

способствует выяснению физической природы усталости металлов. С позиций дислокационной теории усталостное разрушение обуславливается возвратно-поступательным движением дислокаций и их взаимодействием между собой и другими дефектами кристаллической решетки. Таким образом, в результате аннигиляции дислокаций, порождения вакансий, локального повышения температуры и напряжений образуются различные по размерам трещины [82].