

## 2. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАШИН

### 2.1. Классификация и причины отказов

Классификация отказов может быть проведена по различным признакам.

Отказы делят на *отказы функционирования*, при которых выполнение своих функций объектом прекращается (например, поломка зубьев шестерни), и *отказы параметрические*, при которых некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах (например, потеря точности станка).

Причинами отказа являются результаты процессов и события, обуславливающие его возникновение. К процессам относятся изнашивание, рост трещин, коррозия и старение материалов. Событиями, приводящими к отказам, могут быть чрезмерные нагрузки, попадание абразива в масло, нарушение установленных режимов и правил эксплуатации и т.п. Состояниями изделий, являющимися причинами отказов, могут быть повреждение защиты от попадания влаги и пыли, макро- и микротрещины, риски или царапины, дефекты сборки и т.п. Причины отказов делятся на случайные и систематические. Случайными причинами являются непредусмотренные перегрузки, ошибки обслуживающего персонала, сбои системы управления, дефекты материала и погрешности изготовления. В качестве систематических причин выступают закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений: влияние температуры, среды, времени (например, коррозия, старение), нагрузки и работа трения (износ, усталость, ползучесть), функциональные воздействия (засорения, утечки и др.).

В соответствии с этими причинами отказы делятся на внезапные и постепенные.

*Постепенный отказ* – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Например, постепенное увеличение расхода масла до недопустимой величины вследствие износа деталей цилиндропоршневой группы двигателя.

*Внезапный отказ* – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Например, резкое падение давления и увеличение расхода рабочей жидкости в гидросистеме.

В отличие от внезапного отказа наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удастся предупредить наступление отказа или принять меры по устранению его нежелательных последствий.

Четкой границы между внезапными и постепенными отказами, однако, провести не удастся. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, протекают во времени достаточно медленно. Так, усталостная трещина в стенке трубопровода, появившаяся в результате трещинообразного дефекта, медленно растет в процессе эксплуатации. Этот рост в принципе может быть прослежен средствами неразрушающего контроля. Однако собственно отказ (наступление течи) происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение сквозной трещины оказалось невозможным, то отказ придется признать внезапным.

По причинам возникновения различают конструкционные, производственные, эксплуатационные и деградационные отказы.

*Конструкционный отказ* – отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и норм проектирования и конструирования.

*Производственный отказ* – отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

*Эксплуатационный отказ* – отказ, возникающий по причине, связанной с нарушением установленных правил и условий эксплуатации.

*Деградационный отказ* – отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Классификация отказов по последствиям на *легкие, средние и тяжелые* необходима при нормировании надежности (в частности, для обоснованного выбора номенклатуры и численных значений нормируемых показателей надежности), а также при установлении гарантийных обязательств.

*Последствия отказа* – явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.

*Критичность отказа* – совокупность признаков, характеризующих последствия отказа.

Понятие критичности отказа введено для того, чтобы производить классификацию отказов по их последствиям. Классификация отказов по критичности (например, по уровню прямых или косвенных потерь, связанных с наступлением отказа, или по трудоемкости восстановления после отказа) устанавливается нормативно-технической и (или) конструкторской документацией по согласованию с заказчиком на основании технико-экономических соображений и соображений безопасности. Для простых объектов эта классификация не проводится.

При классификации отказов по последствиям могут быть введены два, три и большее число категорий отказов. Отказ одного и того же объекта может трактоваться как *критический*, *существенный* или *несущественный* в зависимости от того, рассматривается объект как таковой или он является составной частью другого объекта.

Отказы также характеризуются взаимосвязью между собой и в целом состоянием объекта и разделяются на ресурсные, независимые и зависимые.

*Ресурсный отказ* – отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

*Независимый отказ* – отказ, не обусловленный другими отказами.

*Зависимый отказ* – отказ, обусловленный другими отказами.

По способу обнаружения отказов они подразделяются на явные и скрытые.

*Явный отказ* – отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению. Например, перегрев двигателя автомобиля, обнаруженный при работе по показаниям указателя температуры охлаждающей жидкости.

*Скрытый отказ* – отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики, например, износ накладок тор-

мозных колодок сверх допустимого значения, обнаруживаемый при регулировке тормозов; замыкание электродов запальной свечи нагаром, обнаруженное при регулировке системы зажигания.

При анализе надежности различают *ранние* отказы, когда проявляется влияние дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и приемочного контроля, и *поздние* отказы. Последние происходят на заключительной стадии эксплуатации объекта, когда вследствие естественных процессов старения, изнашивания и т.п. объект или его составные части приближаются к предельному состоянию по условиям физического износа. Вероятность возникновения деградиционных отказов в пределах планируемого полного или межремонтного срока службы (ресурса) должна быть достаточно мала. Это обеспечивается расчетом на долговечность с учетом физической природы деградиционных отказов, а также надлежащей системой технического обслуживания и ремонта.

*Критерий отказа* – признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и (или) конструктивной документации.

Если работоспособность объекта характеризуют совокупностью значений некоторых технических параметров, то признаком возникновения отказа является выход значений любого из этих параметров за пределы допусков. Кроме того, в критерии отказов могут входить также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.

## 2.2. Причины потери качества

Основными причинами потери качества деталей, узлов, агрегатов и машины в целом являются старение материалов, потеря прочности, изнашивание, коррозия,

*Старение материалов* – процесс постепенного и непрерывного изменения физико-химических свойств материала во времени. Как правило, старение материалов приводит к ухудшению параметров объекта. Старение материалов обусловлено в основном рекристаллизацией материалов, диффузией, хемосорбцией, химическими реакциями, коррозионными процессами и увлажнением, вызывающими изменение начальных свойств материалов, из которых изготовлены элементы. Эти изменения могут привести к повреждению элемента и к опасности возникновения критического отказа систе-

мы. Старение материалов вызывает снижение значений их характеристик во времени. Характер этого снижения определяется начальными свойствами, напряженным состоянием материала, интенсивностью воздействия внешних факторов. Во всех случаях старение материалов представляет собой необратимый процесс (рис. 2.1).

*Прочность* – свойство материала сопротивляться разрушению и изменять форму под воздействием внешних и внутренних нагрузок.



Рис. 2.1. Старение материала пружин подвески

Прочность является главным критерием работоспособности большинства деталей. Различают разрушение деталей вследствие потери:

- статической прочности;
- сопротивления усталости.

Потеря статической прочности происходит при значениях рабочих напряжений, превышающих предел статической прочности материала. Обычно это связано со случайными перегрузками, не учтенными при расчетах, или со скрытыми дефектами деталей (наличием раковин, трещин и т. п.).

Потеря сопротивления усталости происходит в результате длительного действия переменных напряжений, превышающих

предел выносливости материала, например, предел выносливости материала при симметричном цикле изменения напряжений.

Результатом потери прочности детали выступает ее деформация.

*Деформация* – изменение формы или размеров изделия под воздействием внешних сил, при изменении температуры, влажности и иных параметрах внешней среды. Примером этого может служить деформация шатуна (рис. 2.2).

*Упругая деформация* – деформация, исчезающая после устранения внешнего воздействия на изделие; *пластическая деформация* – деформация, остающаяся после снятия нагрузки.



Рис. 2.2. Деформация шатуна

Отказом по параметрам прочности могут быть разрушение изделия или получение недопустимой величины деформации.

Отказы по параметрам прочности чаще всего связаны с изломами, которые подразделяются на хрупкие и вязкие. Под хрупким изломом понимают излом без видимых признаков макроскопических пластических деформаций. Такое разрушение распространяется с большой скоростью, сопоставимой со скоростью распространения звука в данном материале, то есть возникает практически мгновенно. Пластическому излому предшествует пластическая деформация в месте будущего излома.

При работе машины в условиях высоких температур важной характеристикой прочностной надежности является ресурс по ползучести.

*Ползучесть* – явление непрерывной деформации материала при высоких температурах под воздействием постоянных напряжений. В результате ползучести происходит ослабление сопротивляемости материала внешним нагрузкам.

*Изнашивание* – это процесс отделения материала с поверхности твердого тела под действием силы трения.

Износ – результат процесса изнашивания, выраженный в установленных единицах измерения (например, микрометрах). При достижении износа предельно допустимых значений происходит отказ изделия.

Скорость изнашивания – отношение величины износа к интервалу времени, в течение которого он возник.

Интенсивность изнашивания – отношение величины износа к пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы.

*Механическое изнашивание* происходит в результате механических воздействий.

*Абразивное изнашивание* проявляется вследствие попадания между трущимися поверхностями абразивных частиц более высокой твердости, чем поверхности сопрягаемых деталей.

*Изнашивание при пластическом деформировании* – перемещение поверхностного материала в сторону скольжения (резьбовые соединения, вкладыши подшипников скольжения, втулки). Примером может служить износ вала, представленного на рис. 2.3.

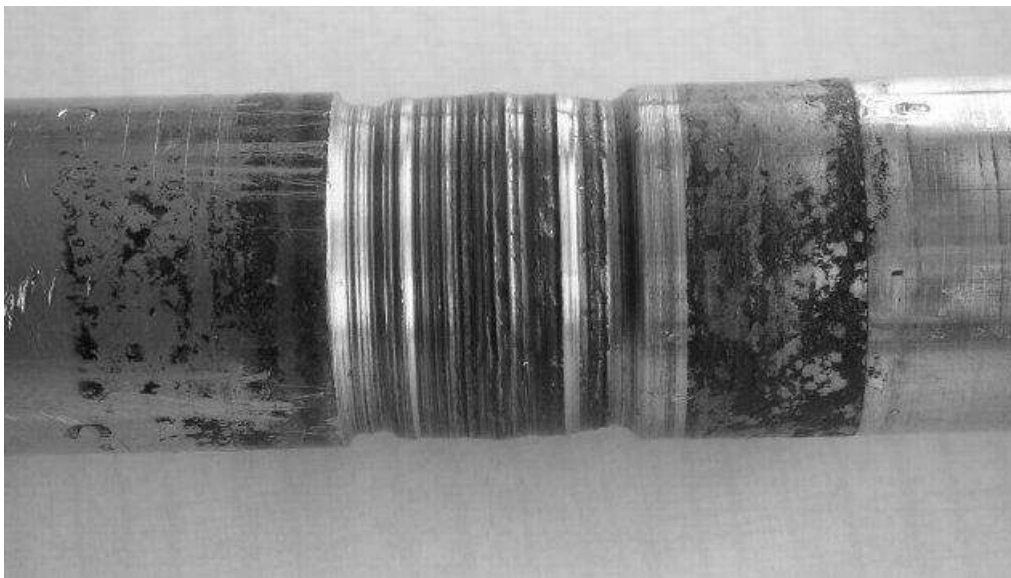


Рис. 2.3. Износ вала

*Изнашивание при хрупком разрушении* – аналогично изнашиванию при пластическом деформировании, но более интенсивно. При этом поверхностный слой соприкасаемых деталей в результате

трения и деформирования подвергается наклепу, становится хрупким и разрушается с потерей массы (дорожки подшипников качения).

*Усталостное изнашивание* – образование поверхностных усталостных трещин под воздействием повторяющихся знакопеременных сил. Микротрещины растут и выкрашиваются, при этом смазка способствует процессу выкрашивания, действуя по механизму расклинивания (газораспределительный механизм, зубчатые передачи).

*Молекулярно-механическое изнашивание* происходит в результате молекулярного взаимодействия трущихся поверхностей. Имеет место при недостатке смазки, больших давлениях, температурах и скоростях скольжения.

*Схватывание* – временное микросваривание участков трущихся поверхностей. Впоследствии при сохранении силового воздействия схватывание разъединяется.

*Агдезия* – сначала происходит процесс схватывания, затем схватывание разъединяется с втиранием одного материала в поверхность другого. При более жестких условиях трения разъединения не происходит и детали заклинивает (шейки коленвала, зеркала цилиндров).

*Коррозионно-механическое изнашивание* – механическое изнашивание, усиленное явлением коррозии.

*Окислительное изнашивание* происходит под воздействием агрессивных сред, в результате чего на поверхности образуются оксиды металлов (подробнее рассмотрено ниже). Износостойкость оксидов существенно ниже износостойкости основных металлов, и оксидная пленка истирается. После выработки оксиды вновь образуются и далее истираются. Цикл неоднократно повторяется, в результате чего поверхность изнашивается (шарнирные соединения).

*Феттинг-коррозионное изнашивание* характерно для поверхностей, подверженных, кроме окисления, вибрациям с высокой частотой и малыми амплитудами. При этом частицы оксидов не только истираются, но и осыпаются. Продукты окисления являются и абразивами (соединения корпусных деталей двигателя, картера сцепления).

*Эрозийное изнашивание* – вырывание частиц с поверхностей деталей, обдуваемых газами с высокой температурой и скоростью (камеры сгорания, выпускные клапаны).



*Кавитационное изнашивание* происходит при омывании твердого тела жидкостью за счет локального изменения давлений и температур (лопасти водяного насоса).

Часто различные виды изнашивания обнаруживаются комплексно: на зеркале цилиндра в различной степени проявляются почти все виды изнашиваний.

*Коррозия* – физико-химическая реакция металлов и сплавов с окружающей средой, в результате чего они теряют свои свойства. Коррозия ускоряет процессы изнашивания, усталостного разрушения, снижает прочностные и деформационные свойства изделия.

Критериями отказов по коррозии являются величина коррозии и ее скорость. Данные параметры выражаются через параметры коррозионной стойкости, характеризующей способность металла сопротивляться коррозионному воздействию среды.

Коррозионная стойкость оценивается:

- изменением в результате коррозии массы металла, отнесенной к единице поверхности и единице времени;
- объемом выделяющегося в процессе коррозии водорода (или поглощения кислорода), отнесенным к единице поверхности и единице времени;
- уменьшением толщины металла, выраженной в линейных единицах, и отнесенным к единице времени;
- изменением какого-либо показателя механических свойств за определенное время, выраженного в процентах, или временем до разрушения образца заданных размеров;
- временем до появления первого коррозионного очага.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Перечислите виды отказов.
2. В чем отличие упругой деформации от пластической?
3. Что означает термин «ползучесть»?
4. Каковы критерии критичности отказа?
5. Перечислите виды изнашивания.
6. Сформулируйте, в чем заключается отличие коррозии от кавитационного изнашивания?