

Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный
аграрный университет»

**В. В. Петроченко, Е. Е. Кузнецов,
А. В. Якименко, А. А. Кислов**

***НАДЕЖНОСТЬ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ***

Учебное пособие

Благовещенск
Дальневосточный ГАУ
2024

УДК 629.017
ББК 34.41
Н17

Рецензент

*Дмитрий Анатольевич Дегтярев, кандидат технических наук,
преподаватель кафедры естественно-научных и общетехнических дисциплин
Дальневосточного высшего общевоинского командного ордена Жукова
училища имени Маршала Советского союза К. К. Рокоссовского*

*Рекомендовано к использованию в учебном процессе
методическим советом факультета механизации сельского хозяйства
Дальневосточного государственного аграрного университета*

Надежность технических систем : учебное пособие /
Н17 В. В. Петроченко, Е. Е. Кузнецов, А. В. Якименко, А. А. Кис-
лов ; Дальневост. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск : Дальнево-
сточный ГАУ, 2024. – 197 [1] с.

ISBN 978-5-9642-0599-9

Учебное пособие разработано в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования, образовательными программами и рабочей программой дисциплины «Надежность технических систем». Оно содержит основные понятия теории надежности машин. Приведены методы расчета количественных показателей надежности. Описаны физические основы надежности и пути ее повышения.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по инженерным направлениям подготовки бакалавриата и магистратуры, а также для аспирантов технических специальностей.

УДК 629.017
ББК 34.41

ISBN 978-5-9642-0599-9 © Петроченко В. В., Кузнецов Е. Е., Якименко А. В.,
Кислов А. А., 2024
© ФГБОУ ВО Дальневосточный
государственный аграрный университет, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лекция 1. Основные положения теории надежности	5
1.1 Роль надежности в хозяйстве	5
1.2 Взаимосвязь качества и надежности	8
1.3 Основные задачи теории надежности	14
Лекция 2. Основные термины и определения	17
2.1 Объекты, рассматриваемые в надежности	17
2.2 Техническое состояние объекта	18
2.3 Классификация отказов	21
2.4 Ремонт и техническое обслуживание	28
Лекция 3. Свойства, определяющие надежность объекта	34
Лекция 4. Показатели надежности	43
4.1 Понятия о показателях надежности	43
4.2 Единичные показатели надежности	44
4.2.1 Показатели безотказности	44
4.2.2 Показатели долговечности	54
4.2.3 Показатели ремонтпригодности и восстанавливаемости	58
4.2.4 Показатели сохраняемости	60
4.3 Комплексные показатели надежности	62
4.4 Экономические показатели надежности	65
Лекция 5. Физические основы надежности машин	67
5.1 Причины нарушения работоспособности	67
5.2 Сущность трения	70
5.3 Явления при трении и изнашивании	76
5.4 Способы смазки трущихся поверхностей	77
5.5 Понятие об износе и изнашивании	78
5.6 Классификация видов изнашивания	80
5.7 Структурная приспособляемость материалов при трении	89
5.8 Нормальные и патологические процессы трения	92
Лекция 6. Повреждение деталей машин при отсутствии трения	97
6.1 Виды повреждения деталей при отсутствии трения	97

6.2 Способы определения износа деталей	107
6.3 Приработка деталей машин.....	108
Лекция 7. Предельное и допустимое состояния деталей и соединений.....	116
7.1 Изнашивание как случайный процесс	116
7.2 Предельные и допустимые значения износов.....	117
7.3 Критерии обоснования предельного состояния деталей машин.....	119
7.4 Теоретическое обоснование предельных изменений посадок в сопряжениях.....	124
7.5 Определение предельного состояния геометрической формы деталей.....	127
Лекция 8. Резервирование в технических системах	132
8.1 Виды резервирования	132
8.2 Последовательное соединение элементов	136
8.3 Параллельное соединение элементов	138
8.4 Параллельно-последовательное соединение элементов	141
8.5 Ненагруженный резерв.....	142
Лекция 9. Испытание техники на надежность	146
9.1 Термины обеспечения и анализа надежности.....	146
9.2 Классификация испытаний	147
9.3 Виды испытаний.....	148
9.4 Планы испытаний.....	155
9.5 Требования, предъявляемые при испытаниях.....	157
Лекция 10. Пути повышения надежности машин.....	159
10.1 Стадии обеспечения надежности машин.....	159
10.2 Обеспечение надежности при проектировании.....	160
10.3 Обеспечение надежности при изготовлении машин. Роль технологии	183
10.4 Обеспечение надежности при ремонте.....	187
10.5 Обеспечение надежности при эксплуатации	191
Список рекомендуемой литературы.....	196

ЛЕКЦИЯ 1.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1 Роль надежности в хозяйстве

Машины в процессе эксплуатации подвергаются различным воздействиям, в результате чего изменяется их техническое состояние и ухудшаются основные параметры: расход топлива, рабочие скорости, мощность, тяговое усилие, производительность и т. д. Основные причины снижения характеристик машин – нарушение исходных регулировок, ослабление креплений, изменение свойств материалов, изменение зазоров и натягов в сопряжениях, изнашивание деталей и их поломка.

Современная техника очень разнообразна и состоит из большого числа взаимодействующих элементов. Современные машины могут содержать миллионы различных деталей. В таких сложных системах поломка всего одного ответственного элемента может привести к выходу из строя всей системы. Низкий уровень надежности оборудования может приводить к большим затратам на ремонт, невыполнению ответственных задач, прекращению снабжения населения электроэнергией, водой и продовольствием, а иногда к авариям, связанным с большими экономическими потерями, разрушением крупных объектов или человеческими жертвами.

В настоящее время наблюдается быстрое усложнение машин, объединение их в крупные комплексы, уменьшение металлоемкости с повышением силовой нагруженности. Поэтому наука о надежности быстро развивается.

Надежность современных машин выше тех, которые были 60 лет назад. Например, трактор ХТЗ-15 требовал подтяжки шатунных подшипников через 50 мото·часов, а современные тракторы требуют подобного вмешательства лишь через 5 000 мото·часов.

Поломки деталей и узлов в разных машинах могут иметь различные последствия. Поломка универсального токарно-винторезного станка, которые имеются на заводе в большом количестве, не приведет к существенному снижению выпуска продукции, а поломка специального станка, встроенного в автоматическую линию, вызовет значительные убытки и невыполнение заводом плана. К большим потерям может привести поломка машинно-тракторного агрегата на уборочной или посевной.

Чем совершеннее технические характеристики изделия, тем большее значение приобретает их сохранение в процессе эксплуатации. Однако с совершенствованием техники обеспечить ее надежность становится труднее, так как она зависит не только от качества элементов в машине, но и от их количества. Иногда бывает достаточно выйти из строя одной детали, чтобы нарушилась работоспособность всей системы.

Так, в 1962 г. произошел случай, когда самолет «Боинг 707» стоимостью 1 млн. долларов потерпел крушение из-за болта рулевого управления, цена которого 4 цента. В 1965 г. в США произошла беспрецедентная авария в системе электроснабжения из-за реле на распределительном щите гидроэлектростанции «Сэр Бэк Планта № 2», в результате чего в течение 10 часов была обесточенной территория страны с населением 40 миллионов человек.

Поэтому надежностью является одним из главных требований к современной технике.

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

К параметрам, обеспечивающим выполнение требуемых функций, относятся кинематические и динамические параметры, конструкционная прочность, показатели точности, производительности, скорости и т. д. С течением

времени значения параметров могут изменяться. Поэтому надежность рассматривается как временное свойство объекта, способного удовлетворительно выполнять заданные функции. Таким образом, *надежность – это сложное понятие, объединяющее ряд свойств объекта, связанных с качеством выполнения его функций.*

До сравнительно недавнего времени надежность не была рассчитываемым параметром, а закладывалась конструктором интуитивно. В технических условиях оговаривались основные технические характеристики изделия, но не указывался требуемый уровень надежности. Сейчас надежность стала общепризнанным параметром и согласно государственному стандарту конструктор должен закладывать ее в документацию наряду с остальными характеристиками. Он должен не только спроектировать изделие с заданными техническими параметрами, но и обеспечить его способность сохранять эти параметры в течение требуемого периода эксплуатации.

Но оценить надежность разрабатываемого образца значительно сложнее, чем его соответствие остальным характеристикам. Она зависит от большего числа факторов, чем любой другой параметр. Например, если скорость автомобиля зависит главным образом от двигателя, то его надежность зависит почти от всех механических и электрических частей. Поэтому достижение высокой надежности техники возможно, когда ее обеспечение будет находиться в центре внимания не только конструкторов, но и технологов, а также обслуживающего персонала.

Повышение надежности техники имеет также большое экономическое значение, так как на ремонт и техническое обслуживание машин затрачиваются большие средства, и повышение надежности ведет к существенной экономии. По данным Института экономики и организации промышленного производства, на запасные части приходится от 40 до 75 % затрат от себестоимо-

сти капитального ремонта машины. Стоимость запасных частей для сельхозмашин, находящихся в эксплуатации, превышает стоимость самих машин. В ремонтных службах занято около миллиона металлорежущих станков и работает свыше 2 миллионов человек, что больше чем в металлургии и нефтяной промышленности вместе взятых.

В сельском хозяйстве регистрируемые и учитываемые простои различных машин на пахоте составляют 35 %, а на уборке урожая – до 50 % от всего времени работы машин.

1.2 Взаимосвязь качества и надежности

Каждому изделию в зависимости от его назначения свойственны особые показатели качества. Например, для станка важны точность, производительность, степень автоматизации; для автомобиля – скорость, грузоподъемность, расход горючего. Но начальные характеристики и номинальные параметры машины показывают лишь ее технические возможности. Эти возможности могут быть использованы только в процессе ее эксплуатации. Даже самые совершенные начальные характеристики – это необходимое, но еще недостаточное условие высокого качества изделия. Чтобы полностью оценить качество, нужно знать не только эти показатели, но и способность изделия сохранять их в процессе работы.

Поэтому качество машины должно включать не только ее технические характеристики, но и высокую надежность. Эти составляющие качества взаимосвязаны и имеют значение только во взаимодействии друг с другом. Сама по себе надежность еще не определяет высокого качества машины. Машина может быть исключительно надежна, но обладать несовершенными техническими характеристиками – малой точностью, низкой производительностью и

т. д. С другой стороны, какими бы не были высоки ее технические характеристики, если она ненадежна в работе, то они не могут быть полноценно использованы.

Под качеством продукции понимается совокупность свойств объекта, определяющих степень его пригодности для использования по назначению.

Качество продукции характеризуется целым рядом свойств:

1. *Эксплуатационные показатели и потребительские свойства* (для трактора – мощность, скорость, проходимость, расход топлива; для станка – точность, производительность, степень автоматизации).

2. *Надежность.*

3. *Технологичность.*

4. *Показатели технической эстетики* (внешний вид и т. д.), *эргономические показатели* (физиологические и гигиенические; удобство в работе).

5. *Степень стандартизации, унификации и взаимозаменяемости.*

Применительно к новой сельскохозяйственной технике эта совокупность свойств включает в себя 10 групп единичных показателей качества. Рассмотрим их подробнее.

Показатели назначения (ПНЗ) характеризуют свойства объекта, определяющие его основные функции, для выполнения которых он предназначен. К основным функциям трактора, например, относятся мощность двигателя и тяговое усилие; автомобиля – скорость и грузоподъемность; комбайна – пропускная способность молотилки и т. д.

Показатели надежности (ПН) характеризуют свойства объекта сохранять и восстанавливать его работоспособность в процессе эксплуатации (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость).

Показатели технологичности (ПТ) характеризуют приспособленность конструкции к ее изготовлению и эксплуатации. Первый из ПТ (приспособленность к изготовлению) называют *производственной технологичностью*, а

второй (приспособленность преимущественно к техническому обслуживанию и ремонту) – эксплуатационной технологичностью.

Показатели транспортабельности (ПТР) характеризуют приспособленность объекта к транспортировке. К ПТР относятся такие оценочные показатели, как средняя продолжительность (трудоемкость) подготовки объекта к транспортировке, его установки на средство перевозки, разгрузки из определенного вида транспорта. ПТР определяют для конкретного вида транспорта: железнодорожного, автомобильного, водного и воздушного.

Показатели стандартизации и унификации (ПСУ) характеризуют насыщенность объекта стандартными, унифицированными и оригинальными частями, а также уровень унификации с другими изделиями. К стандартным относятся составные части изделия, выпускаемые по государственным или отраслевым стандартам. Унифицированные составные части выпускают по стандартам предприятия или получают в готовом виде как комплектующие детали или сборочные единицы. Например, можно привести степень унификации тракторов семейства «Беларусь» (базовая модель МТЗ-80): с МТЗ-80х – 88 %, с МТЗ-82 – 92%. Довольно высокая степень унификации достигнута за счет многократного применения таких агрегатов и сборочных единиц, как дизель, радиатор, сцепление, коробка передач, тормоза, электрооборудование и др. К оригинальным относятся части объекта, разработанные только для данного изделия.

Показатели безопасности (ПБ). Безопасность – свойство объекта при изготовлении и эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей. Учет ПБ необходим для обеспечения безопасных условий работы человека при наличии механических, электрических и тепловых воздействий, а также акустических шумов. ПБ оценивают количественно и качественно. К количественным ПБ относятся давле-

ние срабатывания клапана-бустера гидрораспределителя, сопротивление изоляции токоведущих частей и т. д. *Качественные* характеристики ПБ – наличие ремней безопасности, аварийной сигнализации и т. д.

Хотя безопасность не входит в общее понятие надежности, она связана с этим понятием в случае, если отказы могут привести к вредным условиям для людей и окружающей среды.

Эргономические показатели (ЭРП) характеризуют не отдельный объект, а систему «человек – машина» с точки зрения удобства и комфорта эксплуатации конкретного изделия. К ним относятся: соответствие конструкции машины размерам и форме тела человека, а также его силовым возможностям; соответствие изделия восприятию человека и т. д. Для повышения уровня ЭРП проводят работы по совершенствованию тракторных и комбайновых кабин.

В новых кабинах тракторов МТЗ-80 и МТЗ-82 устанавливают отопительные устройства, сидения с унифицированным посадочным местом и др. Для комбайнов «Дон-1500» разработана герметизированная кабина с хладоновым кондиционером, что способствует созданию комфортных условий работы комбайнера.

Экологические показатели (ЭКП) характеризуют еще более сложную систему «человек – машина – среда» с точки зрения уровня вредных воздействий на природу, возникающих в процессе эксплуатации машин. При количественной оценке ЭКП определяют вероятность выбросов в окружающую среду вредных частиц, газов, излучений и других загрязнений (стандарт ЕВРО-4: норма выбросов в 1,5 раза ниже, чем в ЕВРО-3).

Эстетические показатели (ЭСП) характеризуют рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения изделия. Они приобретают все большую значимость при контроле каче-

ства техники. ЭСП оценивает экспертная комиссия, состоящая из квалифицированных специалистов с опытом работы в области художественного конструирования.

Патентно-правовые показатели (ППП) характеризуют степень обновления технических решений, использованных в конкретном объекте, их патентную защиту, а также возможность беспрепятственной реализации изделия за рубежом. Основные из данных показателей – патентная защита и патентная чистота.

Таким образом, надежность является одной из обязательных составляющих качества любого изделия. Однако она существенно отличается от других его составляющих.

Многие технические характеристики объекта бывают не связаны друг с другом и не заменяют одна другую. Например, станок может обладать высокой степенью автоматизации, большой производительностью, но иметь низкую точность; автомобиль – высокую скорость, хорошую проходимость, но большой расход горючего. Надежность же связана со всеми остальными свойствами изделия и характеризует проявление всех показателей качества объекта.

Например, большая производительность станка не может быть эффективно использована, если станок обладает низкой надежностью, часто выходит из строя и в ремонте находится больше времени, чем в работе. Недостаточная надежность снижает достоинства любого объекта. Хотя, сама по себе надежность еще не означает высокого качества объекта. Машина может быть очень надежна, но обладать низкими техническими характеристиками.

Можно сказать, что понятие надежности характеризуется мерой доверия к машине. Если машина часто выходит из строя – то она ненадежна, мы ей не доверяем. И, наоборот, машина, поломки которой происходят сравнительно редко, считается надежной.

Надежность является комплексным свойством, характеризующим качество любого объекта. Она имеет вполне конкретное значение и может быть точно измерена, испытана и даже распределена между отдельными частями машины. Высокая надежность машины в сельском хозяйстве имеет большое значение, так как позволяет своевременно выполнять работы, связанные с агротехническими сроками, климатическими и метеорологическими условиями.

Надежность машины зависит от надежности ее агрегатов, узлов и других структурных элементов, в том числе смазки, краски, топлива.

В определение надежности входят три важнейших элемента: *выполнение изделием заданных функций; время, в течении которого должно быть обеспечено выполнение этих функций; условия эксплуатации, в которых может обеспечиваться выполнение этих функций.* Рассмотрим их подробнее.

Любое изделие предназначается для выполнения определенных функций. В зависимости от времени и условий использования изделие может выполнять свои функции хуже или не выполнять их вообще. Возникает вопрос: где граница нормального выполнения, при котором можно считать, что изделие сохраняет требуемый уровень надежности?

В некоторых случаях определить, выполняет изделие заданные функции или не выполняет, не представляет труда. Например, реле. Оно может либо срабатывать, либо не срабатывать. Если оно безотказно срабатывает – оно выполняет заданную функцию; если не срабатывает, то не выполняет. Но в большинстве случаев определить это сложнее. Например, у радиоприемника перегорела лампочка освещения шкалы или появились значительные искажения звука. Но в обоих ли случаях приемник перестал выполнять заданные функции?

Следующим элементом, входящим в понятие надежности, является время, поскольку ни одно изделие не может сохранять свои характеристики бесконечно долго. Поэтому говорить о надежности изделия без конкретного указания промежутка времени бессмысленно.

Последним элементом являются условия эксплуатации. Любой уровень надежности изделия будет справедлив только для каких-то конкретных условий эксплуатации, при определенной внешней среде и режимах использования. Одно и то же изделие может иметь самую различную надежность в разных условиях и режимах работы. Например, у одной и той же марки автомобиля при эксплуатации на дорогах с различным покрытием ресурсы будут различные. Если не будут выполняться условия хранения и транспортирования, то изделие также может потерять работоспособное состояние.

Для объектов, которые могут быть источником опасности, важными понятиями являются безопасность и живучесть.

Постоянное усложнение техники, увеличение мощности, концентрация энергии в ограниченных объемах и рост требований к безопасности привел к необходимости разработки научных основ надежности технических систем.

1.3 Основные задачи теории надежности

Теория надежности – наука, изучающая закономерности возникновения отказов техники, а также способы их предупреждения и устранения для получения максимальной эффективности технических систем.

Основными задачами теории надежности являются: установление причин и закономерностей возникновения отказов; изучение влияния различных факторов на надежность; разработка методов оценки и расчета надежности машин; разработка методов испытаний на надежность; определение методов обеспечения надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Эти задачи могут решаться двумя путями.

Первый путь основан на изучении физико-химических свойств элементов машин, происходящих в них процессов и природы отказов; при этом текущее

состояние машин описывается уравнениями, отражающими физические закономерности.

Второй путь основан на теории вероятности – науки, изучающей закономерности случайных явлений. Он дает возможность на основании статистической обработки опытных данных заранее установить, когда и какие неисправности могут возникнуть в конкретной группе машин. Но при этом методе различные физические состояния деталей и машин сводятся к двум состояниям – исправности и неисправности (полной или частичной).

В настоящее время наиболее разработана вероятностная теория надежности. Это обусловлено тем, что на машины воздействуют одновременно множество различных факторов, которые суммарно приводят к потере работоспособности. Однако более верное направление дальнейшего развития теории надежности – *сочетание вероятностных методов с учетом физико-химической природы процессов, протекающих в изделии.*

Таким образом, **основная задача науки о надежности** – *рассчитывать и изготавливать долговечную технику.*

В настоящее время существуют **два основных подхода к оценке надежности технических систем:**

1) функциональный – *при этом подходе о надежности конкретного изделия судят по величинам, определяющим его состояние, например, температура, вибрация, мощность, КПД, шумовая характеристика и т. д.;*

2) вероятностно-статистический – *в этом случае рассматривается и оценивается не конкретный образец техники, а среднестатистический, а также вероятность его пребывания в том или ином состоянии.*

Первый подход более прогрессивен, связан с развитием систем диагностирования и позволяет дать заключение о состоянии изделия в целом или его отдельных узлов без разборки. Однако диагностирование всех элементов ма-

шин, на настоящем этапе развития, является неразрешимой задачей, что предопределяет основное применение вероятностно-статистических методов в теории и практике надежности.

Задача обеспечения надежности техники состоит из трех этапов:

1. Исследование, проектирование и расчет определенной надежности.

Это самый ответственный этап, так как несовершенство конструкции одинаково сказывается на всех экземплярах рассматриваемой модели машины.

2. Производство машины. Ее надежность на этом этапе зависит от качества материала деталей и точности их изготовления, от качества сборки и обработки, других составляющих технологического процесса. Здесь нарушение технологического процесса может снизить качество у части экземпляров.

3. Эксплуатация объекта. Надежность объекта зависит от обслуживания и ремонта, от условий эксплуатации, соблюдения правил эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Что такое надежность?
2. Что такое качество продукции и чем оно характеризуется?
3. Какие существуют показатели качества?
4. Что такое безопасность объекта?
5. Что такое теория надежности?
6. Какие существуют подходы к оценке надежности технических систем?

ЛЕКЦИЯ 2.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

2.1 Объекты, рассматриваемые в надежности

Термины и определения надежности заложены в ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения».

(Технический) объект – *предмет рассмотрения, на который распространяется терминология в области надежности.* Иначе говоря, объект – это любое изделие, которое можно рассматривать в отдельности. Объектами могут быть машины, агрегаты, отдельные детали, системы, а также сооружения и приборы.

В теории надежности рассматриваются следующие обобщенные объекты:

Изделие – *единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться в штуках или экземплярах.*

Система – *объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определенном контексте как единое целое, отделенное от окружающей среды.*

Система обычно определяется с точки зрения достижения определенной цели, например, выполнения требуемых функций. Для системы, как правило, установлена граница, отделяющая ее от окружающей среды и других систем. Если такая граница не установлена, систему называют открытой. Однако на работу системы может влиять окружающая среда и для ее работы могут требоваться внешние ресурсы (лежащие вне границ системы). Например, система охлаждения двигателя, система питания, система зажигания.

Элемент – *объект, у которого отсутствуют (или в рамках данного исследования не рассматривают) составные части.* Понятие элемента и си-

системы в зависимости от поставленной задачи может трансформироваться. Машино-тракторные агрегаты, автомобили и другие сельхозмашины можно рассматривать как системы, состоящие из отдельных элементов – сборочных единиц. Сборочная единица также может рассматриваться как система, состоящая из деталей.

Станок, например, при определении его собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т. д., а при изучении надежности автоматической линии он рассматривается как элемент этой линии.

Наработка – *продолжительность или объем работы объекта*. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. д.), так и дискретной (число рабочих циклов, запусков и т. д.).

2.2 Техническое состояние объекта

Техническое состояние – *состояние объекта в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, характеризующееся фактическими значениями параметров, установленных в документации*.

Исправное состояние – *состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект*.

При этом учитываются не только основные требования, но и дополнительные, например, требования к лакокрасочному покрытию и т. д. Исправной считают машину, пригодную к использованию по назначению и полностью укомплектованную положенными агрегатами и механизмами, отрегулированными, нормально работающими и обеспечивающими безопасность движения.

Неисправное состояние – состояние объекта, в котором хотя бы один параметр объекта не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на этот объект.

Работоспособное состояние – состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации.

Отсутствие необходимых внешних ресурсов может препятствовать работе объекта, но это не влияет на его пребывание в работоспособном состоянии. Работоспособное состояние может быть определено, как состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям, установленным в документации на этот объект. Например, если автомобиль развивает требуемую скорость, расход топлива и масла не превышает установленные значения, отсутствуют недопустимые шумы и вибрация, давление масла в двигателе и воздуха в шинах соответствует установленным нормам, то он работоспособен. Для сеялки это обеспечение нормы высева, стабильность глубины заделки семян, показатель травмирования зерна и т. д.

Иногда понятие работоспособности отождествляют с понятием исправности, что не совсем правильно. Понятие исправности шире понятия работоспособности. Исправное состояние обязательно включает в себя работоспособное. Но неисправный объект может быть работоспособен, если несоответствие требованиям технической документации не касается функциональных параметров, определяющих эксплуатационные показатели объекта. Например, если у автомобиля не включается сигнал поворота, имеется дефект лакокрасочного покрытия, вмятины на кузове, разбито стекло кабины, отсутствует кожух ремня ГРМ и т. д. Таким образом, исправное и работоспособное состояния не тождественны.

Неработоспособное состояние – *состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект.* Например, не запускается или не развивает требуемую мощность двигатель автомобиля, или расход топлива, масла и содержание вредных веществ в выхлопе превышают допустимые нормы.

Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, в которых объект способен частично выполнять требуемые функции. Например, у автомобиля не включается какая-то передача.

Для решения многих вопросов надежности, основное значение имеет именно работоспособность. Объект считается надежным, если он сохраняет именно работоспособное состояние в течение требуемого промежутка времени и при соблюдении требований эксплуатации.

Состояние готовности объекта – *состояние неработающего работоспособного объекта, в котором объект может выполнять требуемые функции в заданных условиях применения при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.*

Работоспособный объект не всегда находится в состоянии готовности (при отсутствии необходимых ресурсов).

Рабочее состояние – *состояние объекта, в котором он выполняет хотя бы одну требуемую функцию.*

Работающий объект может находиться в работоспособном или в частично неработоспособном состоянии.

Нерабочее состояние – *состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.* Неработающий объект может находиться в любом из состояний, приведенных выше.

Предельное состояние объекта – *состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.* Недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливают на основе критериев предельного состояния объекта. Предельное состояние наступает, когда в результате изнашивания и старения объект приходит в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает восстановления требуемой работоспособности. Признаки предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на данный объект.

Предотказное состояние – *состояние объекта, характеризующееся повышенным риском его отказа.* Предотказное состояние может возникнуть как в результате внутренних процессов (причин), так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования.

Опасное состояние – *состояние объекта, которому соответствует высокая вероятность или высокая значимость неблагоприятных последствий для людей, окружающей среды и материальных ценностей.* Опасное состояние может возникнуть как в результате отказа, так и в процессе работы объекта.

Состояние резервирования – *нерабочее состояние работоспособного объекта, находящегося в резерве, в течение заданного периода времени.* В некоторых случаях объект, находящийся в резерве, может подвергаться воздействию рабочих параметров резервируемого объекта.

2.3 Классификация отказов

Отказ – *это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния.* Кроме отказа, существуют такие понятия как:

Повреждение – *нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния.*

Дефект – *каждое отдельное несоответствие изделия требованиям документации.*

Любой отказ приводит к нарушению работоспособности. Но нарушение работоспособности может проявляться по-разному. Допустим, в станке поломался зуб шестерни, или произошел изгиб вала шпинделя, или разрушился подшипник. Нормальное выполнение станком заданных функций, то есть его работоспособность нарушены, и, следовательно, все перечисленные события являются отказом.

Но бывает, что никаких поломок в станке не происходит, он продолжает работать, но его точность по мере износа уменьшается, и в какой-то момент становится меньше предельно допустимой, оговоренной в конструкторской документации. Это событие также считается отказом потому, что станок уже не может нормально выполнять заданные функции.

Другой пример. Автомобильная шина, по мере увеличения пробега, изнашивается, и однажды этот износ достигнет такого предела, при котором дальнейшее использование шины станет невозможным, так как заметно ухудшится проходимость и управляемость автомобиля.

Но может случиться и другое. Новая неизношенная шина натывается на гвоздь и происходит прокол, в результате чего ее использование становится невозможным из-за потери функций. В обоих случаях произошел отказ, но причины и характер этих отказов различны, это разные типы отказов.

По типу отказы подразделяются на:

1) отказы функционирования (*выполнение основных функций объектом прекращается, например, поломка зубьев шестерни*);

2) отказы параметрические (*некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например, потеря точности станка*).

По своей природе отказы бывают:

1) случайные, которые обусловлены непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала и т. д.;

2) систематические, которые обусловлены закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. д.

Различны также бывают и причины возникновения отказов. По причинам возникновения отказы делятся на группы:

1. Конструктивный отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил или норм проектирования и конструирования. Несовершенство конструкции одинаково сказывается на всех экземплярах рассматриваемой модели машины. Иногда такие отказы называют «детскими болезнями» машины. Обычно со временем конструкцию машины несколько изменяют, чтобы устранить данные недостатки. Например, на ранних выпусках автомобиля «Ока» часто происходили поломки полуосей ведущих колес. На последующих выпусках машины диаметр полуосей и радиус галтелей на них был увеличен, и поломки прекратились.

2. Производственный отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления объекта или его ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии. Качество любых деталей и агрегатов имеет неизбежные случайные вариации. Вариации качества, заключенные в достаточно узких пределах, не оказывают заметного влияния на надежность системы. Но при значительных колебаниях качества, надежность одних экземпляров оказывается намного ниже, чем у других. Поэтому производственные отказы приводят к снижению надежности у части экземпляров. Иногда они могут приводить к снижению качества у целой партии изделий. Это может быть деформация или поломка некоторых деталей при сборке машины, либо попадание загрязнений внутрь механизмов, либо использование для изготовления деталей ненадлежащей марки стали.

3. Эксплуатационный отказ – отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации объекта. Типичными эксплуатационными отказами можно считать: ослабление наружных креплений; загрязнение масляных и топливных фильтров; течь через сальники и другие уплотнения; нарушения регулировки клапанов, системы подачи топлива и др. Для устранения таких отказов не требуется высокой квалификации обслуживающего персонала и сложного оборудования, производится оно непосредственно на предприятии. Однако могут быть эксплуатационные отказы и с более серьезными последствиями. Например, заклинивание вкладышей коленчатого вала вследствие применения масла ненадлежащей марки или заворачивание поршневых колец из-за перегрузки двигателя в обкаточный период.

4. Деградационный отказ (старение) – отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил проектирования, изготовления и эксплуатации.

Следует различать понятия физического и морального старения. Морально устаревшие объекты могут быть надежными, однако они уступают по различным параметрам новым машинам.

Для теории и практики решающее значение имеет деление всех отказов по характеру возникновения на две основные категории: внезапные и постепенные, хотя деление это является условным и отделить одни отказы от других не всегда бывает просто.

1. Постепенный отказ – возникает в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Вызван изнашиванием деталей и старением материалов. До тех пор пока изменение параметров не выходит за допустимые пределы, мы миримся с этим и считаем, что изделие

работоспособно. Когда физико-химические процессы, происходящие в элементах объекта, приведут к выходу параметров за допустимые пределы, произойдет отказ.

Улучшение или ухудшение условий эксплуатации может лишь замедлить или ускорить появление постепенного отказа. Полностью исключить постепенные отказы можно, лишь выполнив профилактическую замену элементов, близких к предельному состоянию. Профилактическая замена элементов является важнейшим средством повышения надежности объектов.

2. Внезапный отказ – характеризуется скачкообразным переходом объекта из работоспособного в неработоспособное состояние. Внезапные отказы обычно проявляются в виде неожиданных поломок деталей без предварительных симптомов их разрушения (трещины, изгибы, разрушения, пробой изоляции, перегорание электронных элементов и т. д.). Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

3. Систематический отказ – вызван определенной причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и документации. Систематический отказ может быть воспроизведен путем преднамеренного создания тех же самых условий, например, с целью определения причины отказа.

Также отказы подразделяются на следующие:

1) зависимый отказ – отказ вызван возникновением других отказов; например, зависимый отказ наступает при заклинивании вкладышей коленчатого вала из-за отказа масляного насоса;

2) независимый отказ – отказ, не вызванный возникновением других отказов; отказ стеклоомывателя не может быть зависим от отказа троса ручного тормоза;

3) отказы по общей причине – отказы различных объектов, возникающие вследствие одного события (отказа, ошибки персонала, внешнего или

внутреннего воздействия), которые без рассмотрения причин считались бы независимыми;

4) отказы общего вида – отказы различных объектов, характеризующиеся одним и тем же видом отказа;

5) ресурсный отказ – это отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния; устранение ресурсных отказов связано с трудоемкими разборочно-сборочными, регулировочными и обкаточными работами, для выполнения которых требуется спецоборудование и высококвалифицированный персонал; при этом восстанавливают межремонтный ресурс и повышают другие показатели надежности; примером ресурсных отказов автомобилей и тракторов можно считать предельный износ постелей блоков цилиндров, шеек коленчатого вала; предельный износ гнезд для подшипников коробки передач и др.

По характеру устранения различают виды отказов:

1) сбой – самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора; отличительным признаком сбоя является то, что восстановление работоспособного состояния объекта может быть обеспечено без ремонта, например, путем воздействия оператора на органы управления;

2) перемежающийся отказ – это многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера; например, плохо закрепленная клемма может приводить к периодическому самопроизвольному отключению и включению какой-то электрической цепи.

По легкости обнаружения можно выделить виды отказов:

1) явный (очевидный) отказ – это отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами, средствами контроля, диагностированием при подготовке объекта к применению или в процессе его применения;

2) скрытый (неявный) отказ – это отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля, диагностированием, но выявляемый при проведении технического обслуживания специальными методами диагностики.

По времени возникновения отказы классифицируют:

1) приработочный отказ – отказ, возникающий в начальный период эксплуатации;

2) отказ при нормальной эксплуатации – отказ, возникающий в рабочий период эксплуатации;

3) износостойкий отказ – отказ, вызванный необратимыми процессами износа деталей.

По возможности дальнейшего использования объекта выделяют:

1) полные отказы – характеризуются переходом объекта в неработоспособное состояние; они исключают возможность работы объекта до их устранения;

2) частичные отказы – характеризуются переходом объекта в частично неработоспособное состояние; при этом объект может частично использоваться; например, отказ включений одной из передач КПП.

Последствиями отказов могут быть невыполнение заданных показателей производительности; внеплановый ремонт; досрочная замена узла; завышенный объем работ при плановом ремонте. По последствиям отказы делятся на следующие виды:

1) легкий отказ – легкоустраняемый;

2) средний отказ – не вызывающий отказы смежных узлов, вторичные отказы;

3) тяжелый отказ – вызывающий отказы смежных узлов;

4) тягчайший отказ – отказ, который приводит к человеческим жертвам (отказ рулевого управления или тормозов).

По сложности устранения отказы подразделяют на три группы:

1. Первая группа сложности – это отказы, устраняемые ремонтом или заменой деталей, расположенных снаружи сборочных единиц без разборки последних или когда требуется проводить внеочередные ТО-1, ТО-2.

2. Вторая группа сложности – отказы, устраняемые ремонтом или заменой легкодоступных сборочных единиц и агрегатов (или их деталей), а также отказы, устранение которых требует раскрытия внутренних полостей основных агрегатов без их разборки, или внеочередное проведение ТО.

3. Третья группа сложности – это отказы, для устранения которых необходимы разборка или расчленение основных агрегатов.

2.4 Ремонт и техническое обслуживание

Важное место в обеспечении надежности техники занимает система технического обслуживания и ремонта.

Система технического обслуживания и ремонта – система, включающая в себя совокупность документации, персонала, организационных и технических действий, необходимых для поддержания и восстановления работоспособного состояния объекта.

Ремонт – комплекс технических операций и организационных действий по восстановлению исправного или работоспособного состояния объекта и восстановлению ресурса объекта или его составных частей.

Под ремонтом обычно подразумевается возвращение работоспособности сборочной единице (узлу или агрегату). Ремонт проводится после дефектовки объекта и принятия решения о целесообразности его проведения. Во время ремонта проводится полная либо частичная разборка узла и замена дефектных деталей на годные. Для замены могут быть использованы как новые детали,

так и восстановленные. Ремонт включает локализацию, диагностирование, устранение неисправности и контроль функционирования.

Восстановление – процесс и событие, заключающиеся в переходе объекта из неработоспособного в работоспособное состояние. Под восстановлением обычно подразумевается возвращение первоначальных характеристик детали, которая является частью какого-либо узла. Классический пример восстановления – наплавка опорных катков трактора. Если рассматривать саму процедуру восстановления, то она делится на два основных типа. К первому типу относится восстановление изношенных деталей, имеющих изменения в размерах и геометрических формах поверхности. Ко второму типу – восстановление деталей с механическими повреждениями: трещинами, пробоинами, деформациями.

В зависимости от возможности или невозможности перевода объекта из неработоспособного состояния в работоспособное, объекты классифицируются следующим образом:

1. Самовосстановление – восстановление объекта без вмешательства извне; например, тепловое реле.

2. Восстанавливаемый объект – это объект, восстановление работоспособного состояния которого в рассматриваемой ситуации предусмотрено технической и конструкторской документацией.

3. Невосстанавливаемый объект – это объект, восстановление работоспособного состояния которого в рассматриваемой ситуации не предусмотрено технической и конструкторской документацией.

4. Ремонтопригодный объект – объект, ремонт которого предусмотрен документацией и возможен в заданных условиях. Заданные условия могут включать технические, экономические и другие аспекты.

5. Неремонтопригодный объект – объект, ремонт которого не предусмотрен документацией.

Ремонтопригодные и восстанавливаемые объекты могут иметь более одного отказа, многократно ремонтироваться и после каждого ремонта восстанавливать свою работоспособность. Примерами ремонтпригодных изделий могут служить станки, автомобили, агрегаты, некоторые детали, электронные приборы и многие другие изделия. Большинство объектов сельскохозяйственной техники являются ремонтпригодными.

Неремонтопригодные и невосстанавливаемые изделия могут иметь только один отказ, после которого они подлежат замене. Это подшипники, вкладыши, поршни, поршневые кольца, шаровые наконечники рулевых тяг, фрикционные накладки, предохранители, лампы, свечи зажигания, электронные компоненты (конденсаторы, транзисторы, диоды, микросхемы) и т. д.

Ряд изделий, относимых к неремонтопригодным, можно отремонтировать, но только на специализированных предприятиях, например, подшипники, зубчатые колеса и в некоторых случаях даже лампы накаливания.

Иногда одни и те же изношенные изделия в зависимости от технического состояния или характера дефектов могут быть невосстанавливаемыми (коленчатый вал с трещинами) и восстанавливаемыми (коленчатый вал без трещин). Можно сказать, что не все дефекты подлежат устранению.

Для предотвращения аварийных поломок техники создана планово-предупредительная система ремонта.

Система планово-предупредительного ремонта (ППР) представляет собой комплекс организационно-технических мероприятий предупредительного характера, проводимых в плановом порядке для обеспечения работоспособности парка машин в течение всего предусмотренного срока службы.

Выделяют три вида основных систем планового ремонта:

1. Система периодических ремонтов, которая предусматривает проведение мероприятий по ТО и ремонту каждой единицы техники после отра-

ботки его определенного времени (либо определенного пробега или расхода топлива). Наибольший экономический эффект данная система дает в условиях массового и крупносерийного производства, а также строгого учета наработки оборудования.

2. Система послеосмотровых ремонтов, при которой необходимый объем ремонтных работ определятся после осмотра техники. Применение этой системы целесообразно для эпизодически работающего оборудования, а также для прецизионных станков, точность которых зависит от слаженной работы всех деталей и узлов.

3. Система стандартных ремонтов, которая предусматривает выполнение обусловленного объема ремонтных работ в определенные сроки. Система применяется для специального оборудования, работающего на постоянном режиме.

Техническое обслуживание (ТО) – комплекс организационных мероприятий и технических операций, направленных на поддержание работоспособности (исправности) объекта и снижение вероятности его отказов при использовании по назначению, при хранении и транспортировании. ТО включает регламентированные в конструкторской документации операции, которыми обычно являются: мониторинг технического состояния, очистка, смазывание, регулировка, затяжка ослабших резьбовых соединений и т. д.

Основные виды работ планового и непланового ТО, а также их распределение между исполнителями заносятся в карту технического обслуживания, включающую:

1) ежедневную уборку, чистку и смазку оборудования рабочим, обслуживающим машину;

2) ежедневный и периодический (частичный), а также плановый (полный) осмотр оборудования рабочим с целью своевременного устранения мелких неисправностей и регулировки механизмов во время перерывов в работе;

-
- 3) своевременную (по графику) промывку механизмов и смену масел;
 - 4) профилактическую регулировку, затяжку крепежа и замену быстроизнашивающихся деталей;
 - 5) периодическую проверку геометрической и технологической точности оборудования;
 - 6) осмотр оборудования с целью выявления объема работ очередного ремонта;
 - 7) замену случайно отказавших деталей или восстановление их работоспособности.

Обслуживаемый объект – объект, для которого техническое обслуживание предусмотрено документацией.

Необслуживаемый объект – объект, для которого техническое обслуживание не предусмотрено документацией.

Приняты следующие виды технического обслуживания: ежесменное (ЕО), сезонное (СО), ТО-1, ТО-2 и ТО-3 (для тракторов). Для многих марок новых машин предусмотрено ТО-0, проводимое по окончании обкаточного периода. Также существует ТО пред постановкой техники на хранение и при снятии с хранения.

Проводятся они следующим образом. После трех ТО-1 проводится ТО-2, после трех ТО-2 выполняют ТО-3. После проведения трех ТО-3 делается текущий ремонт (ТР). И после трех ТР производится капитальный ремонт.

Мониторинг технического состояния – составная часть технического обслуживания, представляющая собой наблюдение за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Мониторинг может проводиться в процессе работы объекта непрерывно или через запланированные интервалы времени. На основе данных мониторинга осуществляется контроль технического состояния и оценка его остаточного ресурса.

Контрольные вопросы

1. Что такое объект, элемент и техническая система?
2. Какие существуют технические состояния объекта с точки зрения теории надежности?
3. Чем исправное состояние отличается от работоспособного?
4. Что такое отказ?
5. Какие существуют виды отказов?
6. Что такое ремонт, восстановление и техническое обслуживание объекта?
7. В чем состоит сущность планово-предупредительной системы ремонта?

ЛЕКЦИЯ 3.

СВОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ ОБЪЕКТА

Надежность является одним из свойств любого объекта, определяющим его качество. Она является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя различные свойства и их сочетания.

Безотказность – *свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.*

Иногда говорят, что в технике нет безотказности, так как любой объект когда-нибудь неизбежно откажет. Но в определении безотказности не выдвигается требование, чтобы отказов не было никогда, в нем говорится лишь о способности работать без отказов в течение некоторого периода времени. Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей или с большими экономическими потерями. В таких случаях надежность отождествляют с безотказностью. Например, для самолета важна безотказность в период полета. Также она важна и для сельхозтехники. Многие сельскохозяйственные машины работают всего несколько месяцев, а иногда и несколько недель в году. Например, зерноуборочные комбайны работают в среднем всего 20–30 дней в году. Если в эти дни в комбайне произойдет отказ, и машина станет на ремонт, это может сорвать своевременную уборку урожая и привести к большим потерям. Поэтому для комбайна важна безотказность в течение уборки. После окончания уборки можно уже проверить состояние комбайна и, если нужно, произвести ремонт.

И все же отождествлять безотказность и надежность нельзя. Если комбайн используется лишь во время уборки урожая, а самолет – в часы полета,

то большинство машин и механизмов работают круглый год. Для такого оборудования большое значение имеет не только безотказность в работе в течение ограниченного периода времени, но и сохранение работоспособности в течение длительного времени.

Для того же комбайна важно, чтобы по окончании уборки он мог быть использован и на следующий сезон, и чем больше лет он проработает, тем будет выгоднее. Можно сделать вывод, что надежность многих объектов обуславливается не только их безотказностью, но и их долговечностью.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Таким образом, в отличие от безотказности, долговечность предусматривает перерывы в эксплуатации, обусловленные ремонтом и обслуживанием.

Количественной оценкой долговечности является полный срок службы машины с начала эксплуатации до списания. Однако проектировать новые машины следует так, чтобы сроки службы по физическому износу не превышали моральное старение. Долговечность машин закладывается при их проектировании, обеспечивается в процессе производства и поддерживается в процессе эксплуатации. В связи с этим различают три вида долговечности.

Требуемая долговечность задается техническим заданием на проектирование и определяется достигнутым уровнем развития техники в данной отрасли.

Достигнутая долговечность обуславливается совершенством конструкторских расчетов и технологических процессов изготовления.

Действительная долговечность характеризует фактическую сторону использования машины потребителем.

В большинстве случаев требуемая долговечность больше достигнутой, а достигнутая больше действительной. Однако, нередки случаи, когда действительная долговечность превышает достигнутую. Так, при норме пробега до капитального ремонта 120 тыс. км, некоторые водители при умелой эксплуатации автомобиля достигли пробега без капитального ремонта 400 тыс. км. Надежность объекта зависит от условий эксплуатации. Например, по испытаниям грузового автомобиля один и тот же элемент (рессора) на асфальтобетонном шоссе имеет долговечность свыше 150 тыс. км, а на проселочных дорогах – менее 10 тыс. км. Поэтому показатели надежности имеют смысл только в том случае, если они оговорены условиями эксплуатации, для которых получены или заданы.

Действительная долговечность подразделяется на физическую, моральную и технико-экономическую.

Физическая долговечность определяется физическим износом объекта до его предельного состояния. Для агрегатов определяющим является физический износ базовых деталей (у двигателя – блок цилиндров; у коробки передач – картер и др.).

Моральная долговечность характеризует срок службы, за пределами которого использование данной машины становится экономически нецелесообразным ввиду появления новых более производительных машин.

Технико-экономическая долговечность определяет срок службы, за пределами которого проведение ремонтов данной машины становится экономически нецелесообразным.

В зависимости от назначения объектов на первый план может выдвигаться требование к безотказности, а может к долговечности. Рассмотрим для примера металлорежущий станок. Конечно, нужно стремиться к тому, чтобы отказы в нем происходили как можно реже. Но это скорее желательное, чем

необходимое требование. Отказы станка не приводят к катастрофическим последствиями и если конструкция станка хорошо продумана, то устранение отказа займет мало времени, и вынужденные перерывы в его работе будут непродолжительными. Требования же полной безотказности станка в течение длительного времени может вести к такому увеличению его стоимости, что окупаемость может растянуться на срок, превышающий срок службы.

Поэтому, если для самолета на первое место выдвигается безотказность, а уже затем долговечность, то для металлорежущего станка на первом плане стоит долговечность, а уже затем, исходя из экономических соображений, рассчитывается требуемая производству безотказность. Естественно, что требования безотказности к высокопроизводительному токарному автомату в составе поточной линии будут намного выше, чем к универсальному токарно-винторезному станку с небольшой производительностью.

Следует обратить внимание, что в определении долговечности говорится о сохранении работоспособности до предельного состояния, а не до полного износа. Для каждого объекта назначается свое предельное состояние. Если это авиационный двигатель, то он выводится из эксплуатации до полного исчерпания ресурса, что необходимо для безопасности полетов (то есть между его предельным состоянием и полным окончанием ресурса имеется значительная наработка). Выведенные из эксплуатации авиадвигатели еще долгое время могут служить на машинах для отчистки взлетных полос или в качестве стационарных генераторов, где требования к их безотказности менее жесткие, чем на воздушном транспорте.

Каждое изделие, предназначенное для длительного использования, может ремонтироваться за весь срок своей службы много раз. Но неизбежно наступает такое состояние, когда дальнейший ремонт становится невыгоден или невозможен, например, из-за накопления усталостных напряжений в деталях и других необратимых изменений в материалах. Долговечность изделия зависит

от долговечности его деталей. Определить долговечность детали сравнительно просто. Например, долговечность коленчатого вала автомобиля определяется минимально допустимым диаметром шеек, с учетом перешлифовок шеек. Вал сдается в лом когда дальнейшая перешлифовка становится невозможной из-за исчерпания закаленного слоя или снижения прочности вала.

Значительно труднее определить долговечность всего объекта в целом. Любой объект можно ремонтировать много раз, заменяя изношенные детали. Но стремиться к максимальной долговечности всех технических объектов неправильно. Необоснованно завышенные сроки службы машин и оборудования могут привести к техническому застою. Поэтому для каждого вида объектов должна выбираться не максимальная, а оптимальная долговечность. Если оптимальная долговечность определяется исходя из экономических соображений, необходимо учитывать как производственные, так и эксплуатационные расходы, потому что иногда небольшая экономия при изготовлении изделия ведет к значительным расходам при его эксплуатации, и, наоборот.

Для неремонтируемых объектов понятие безотказности и долговечности совпадают, так как при наступлении первого отказа у них исчерпывается долговечность.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности путем технического обслуживания и ремонта.

Термин ремонтпригодность трактуется в широком смысле. Он эквивалентен международному термину «приспособленность к поддержанию работоспособного состояния».

Рассмотрим понятие ремонтпригодности на следующем примере. Предположим, на предприятии работают два станка одинакового назначения. У обоих станков возникает два отказа в месяц. Но на первом станке на устранение отказа затрачивается один час, на втором – три часа. Понятно, что первый

станок более ремонтпригоден, потому что в его конструкции предусмотрена возможность быстрого обнаружения неисправностей и замены отказавших деталей. На втором станке для замены отказавшей детали приходится разбирать половину станка.

Помимо ремонтпригодности в узком смысле это понятие включает в себя «контролепригодность» и «обслуживаемость».

Контролепригодность – это приспособленность машины к проведению диагностики ее технического состояния и легкости обнаружения дефектов. С усложнением техники становится труднее находить возникающие в ней неисправности. Например, в сложных электрогидравлических системах современных станков поиск причин отказа может занимать более половины от общего времени восстановления работоспособности станка. Поэтому современные машины оснащаются различными системами диагностики, как, например, японские автомобили.

Обслуживаемость – приспособленность объекта к техническому обслуживанию. Она в свою очередь зависит от:

- 1) количества деталей и узлов, требующих систематического обслуживания;
- 2) периодичности обслуживания;
- 3) доступности точек обслуживания и простоты выполнения операции.

Также на ремонтпригодность влияют:

- 1) унификация и взаимозаменяемость деталей и эксплуатационных материалов как внутри одной модели машины, так и между разными моделями;
- 2) конструктивная законченность агрегатов, удобство доступа к ним, возможность их независимого снятия, наличие мест для захвата, простота разборки и сборки;
- 3) способы соединения деталей.

Факторы, влияющие на ремонтпригодность, могут быть объединены в две основные группы: расчетно-конструкторские и эксплуатационные.

К расчетно-конструкторским факторам относятся сложность конструкции, взаимозаменяемость, удобство доступа к узлам и деталям без необходимости съема находящихся рядом узлов и деталей, легкость замены деталей.

Эксплуатационные факторы связаны с возможностями человека-оператора, эксплуатирующего машины, и с окружающими условиями, в которых эти машины работают. К этим факторам можно отнести опыт, мастерство, квалификацию персонала по обслуживанию, а также технологию и методы организации производства при обслуживании и ремонте.

Ремонтопригодность любых изделий важна не только в случае потери работоспособности из-за каких-либо поломок, но и при проведении планового (профилактического) ремонта и ТО с целью предупреждения внезапных отказов, путем осуществление таких мероприятий, как своевременная замена изношенных деталей или агрегатов, смазка, чистка, настройка и регулировка. Большинство автовладельцев положительно отзываются о ремонтопригодности, например, Жигулей, чего не скажешь про иномарку.

Ремонтопригодность закладывается при проектировании и изготовлении изделия и поддерживается в процессе эксплуатации рациональной системой технического обслуживания и ремонта.

Восстанавливаемость – *свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта.* Для восстановления могут требоваться или не требоваться внешние воздействия. Для случая, когда внешние воздействия не требуются, может использоваться термин *самовосстанавливаемость*. Восстанавливаемость не имеет непосредственного отношения к надежности объекта. Восстанавливаемость, являясь свойством объекта, не характеризует его надежность. Объект, обладающий свойством восстанавливаемости, может иметь как высокую, так и низкую надежность, также как и объект, не обладающий этим свойством.

Потеря работоспособности объектов может происходить не только при эксплуатации, но и в процессе длительного хранения, в результате постепенного старения их элементов. Необходимо отметить, что старение многих элементов происходит почти с одинаковой скоростью как во время работы, так и при хранении. Поэтому, наряду с ремонтпригодностью, большое значение для надежности многих объектов имеет сохраняемость.

Сохраняемость – *свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.*

Исправные машины, которые долго не используются, со временем теряют свою работоспособность. Это происходит из-за того, что в процессе хранения и транспортирования они подвергаются неблагоприятным воздействиям: вибрации, колебаниям температуры, действию влажного воздуха, природных осадков, солнечных лучей, пыли и т. д. В результате происходит загрязнение, окисление, коррозия отдельных деталей (особенно в местах их сопряжений), деформация под действием собственного веса или других статичных нагрузок, попадание воздуха в гидросистемы, высыхание, расслоение и старение резиновых и пластиковых деталей. Кроме того, отдельные составные части машины могут быть повреждены насекомыми или грызунами.

Поэтому после хранения или транспортирования объект может оказаться неработоспособным даже в предельном состоянии. Обычно машины, простоявшие длительное время, перед пуском подвергаются дополнительному техобслуживанию или ремонту.

Сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности хранения. Практическая роль этого свойства особенно велика для приборов. Так, по американским источникам, во время второй мировой войны половина радиоэлектронного оборудования для военных нужд вышла из строя в процессе хранения.

Наиболее эффективными методами повышения сохраняемости машиностроительной продукции являются: хранение в закрытых помещениях, консервация, применение специальных защитных покрытий и пропитывающих составов, повышение транспортабельности, а также профилактическое обслуживание подлежащих хранению объектов.

Готовность – *свойство объекта выполнять требуемые функции в заданных условиях, в заданный момент или период времени при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.*

Надежность объекта и его готовность не зависят друг от друга. Показатели готовности объекта функционально зависят от показателей безотказности, ремонтпригодности и восстанавливаемости объекта, а также от внешних условий, предусмотренных проектом. Готовность может относиться как к функционирующему, так и к нефункционирующему объекту.

В зависимости от вида изделия его надежность может определяться всеми или частью перечисленных свойств. Например, надежность подшипника определяется его долговечностью; ракеты-носителя – безотказностью и сохраняемостью; автомобиля – безотказностью, ремонтпригодностью и долговечностью.

Контрольные вопросы

1. Какие свойства определяют надежность объекта?
2. Что такое безотказность объекта?
3. Что такое долговечность объекта?
4. Что такое ремонтпригодность объекта?
5. Что такое сохраняемость объекта?
6. Что такое восстанавливаемость?
7. Что такое готовность?
8. Может ли неисправный объект быть работоспособным?
9. Что такое частично работоспособный объект?

ЛЕКЦИЯ 4.

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

4.1 Понятия о показателях надежности

Надежность нельзя измерить каким-либо прибором. Ее определение связано с рядом трудностей: большое количество переменных факторов; сложность их экспериментального определения; большие затраты времени на испытания, а также частичное или полное разрушение объектов во время испытания. О надежности можно судить лишь по некоторым количественным показателям.

Показатель надежности – это количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта. Показатели могут оценивать срок службы изделия, необходимое количество запасных частей, частоту ремонтов и т. д.

Для определения значений показателей надежности могут быть использованы как точные (теоретические), так и приближенные (статистические) уравнения. Показатель надежности может иметь размерность или не иметь ее. Многие показатели надежности представляют собой параметры распределения случайных величин. Они могут быть получены: на основании анализа эксплуатации; по данным стендовых испытаний с последующим пересчетом применительно к условиям эксплуатации; путем измерений и сравнением с предельными характеристиками деталей. При выборе показателей надежности объекта существенное значение имеет восстанавливаемый это объект или невосстанавливаемый.

Согласно государственного стандарта различают показатели надежности:

1. Единичный показатель – показатель, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта.

2. Комплексный показатель – показатель, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта.

3. Расчетный показатель – показатель, значение которого определяют расчетным методом.

4. Экспериментальный показатель – показатель, значение которого определяют по результатам испытаний.

5. Эксплуатационный показатель – показатель, значение которого определяют по данным эксплуатации.

6. Экстраполированный показатель – показатель, оценка которого определяется на основании расчетов, испытаний или эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность или другие условия эксплуатации.

7. Нормируемый показатель – показатель надежности, значение которого регламентировано нормативной и технической документацией на объект.

4.2 Единичные показатели надежности

4.2.1 Показатели безотказности

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Вероятность безотказной работы является одной из удачных характеристик, и в ряде случаев она является исчерпывающей.

Математически вероятность безотказной работы представляет вероятность того, что время непрерывной работы T будет больше некоторого заданного времени t :

$$P(t) = P(T > t) \quad (4.1)$$

Вероятность безотказной работы на протяжении наработки T определяется по формуле (4.2):

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (4.2)$$

где N_0 – начальное число работающих объектов;

$n(t)$ – число объектов, отказавших к концу наработки T .

Например, если вероятность безотказной работы $P(t)$ в течение наработки T , составившей 1 000 часов, равна 0,95, это означает, что 5 % машин потеряют свою работоспособность за это время. С увеличением числа испытываемых объектов N_0 , $P(t)$ приближается к истинной вероятности. **Истинная вероятность** определяется по формуле (4.3):

$$P(t) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (4.3)$$

Недостатком такого определения истинной вероятности является то, что осуществление бесконечного числа опытов невозможно. Для ее определения понадобилось бы подвергнуть испытаниям все однотипные объекты.

Вероятность безотказной работы, при которой объект считается надежным, зависит от его назначения. Для большинства механических систем приемлемым считается, когда этот показатель составляет около 0,95–0,96. Для космических систем он должен быть не меньше 0,99999.

Вероятность отказа – это вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени. Вероятность отказа – показатель, противоположный вероятности безотказной работы (он же называется функцией распределения $F(t)$):

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0} = 1 - P(t) \quad (4.4)$$

Вероятность отказа представляет собой вероятность того, что наработка T на отказ машины будет меньше некоторой заданной наработки t :

$$Q(t) = P(T < t) \quad (4.5)$$

С увеличением продолжительности наработки вероятность безотказной работы уменьшается, а вероятность отказа, обратно пропорционально ей, увеличивается, что демонстрирует рисунок 4.1.

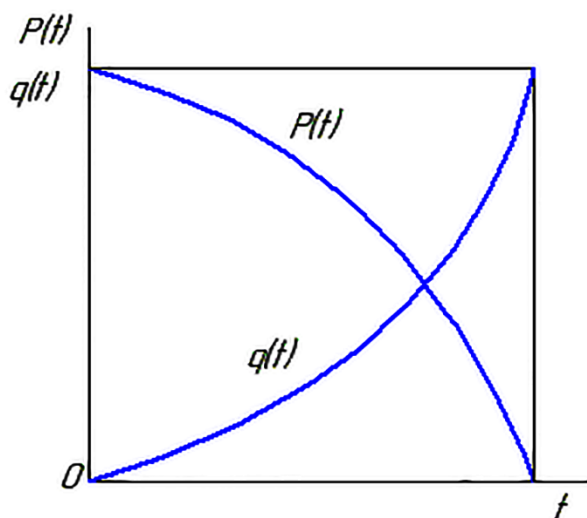


Рисунок 4.1 – Зависимость вероятности безотказной работы и вероятности отказов от времени

Однако у данной характеристики имеются недостатки. Например, если установлено, что вероятность отказа агрегата составляет 0,1, то из этого вовсе не следует, что из 10 агрегатов за определенный промежуток времени выйдет из строя обязательно один. Возможно, их будет два или не будет вообще. Но при большом числе опытов, примерно 10 % агрегатов будут иметь отказы.

Другой недостаток – это невозможность определить какой конкретно агрегат выйдет из строя, так как сама природа вероятности позволяет предсказать число определенных событий в большом числе испытаний, и она не указывает на исход отдельного испытания.

Наработка до отказа – *наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа*. Частным случаем наработки до отказа является наработка до первого отказа.

Средняя наработка до отказа – *математическое ожидание наработки объекта до отказа*. Математическое ожидание случайной величины представляет сумму всех возможных ее значений, помноженных на их вероятность (она приблизительно равна среднему значению случайной величины). Этот показатель применяется для неремонтируемых объектов и определяется при наблюдении за испытанием N объектов в заданных условиях. Статистическая оценка для средней наработки до отказа T_1 определяется формулой (4.6):

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt \quad (4.6)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа;
 $F(t)$ – функция распределения наработки до отказа.

T_1 можно выразить через вероятность безотказной работы:

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (4.7)$$

Оценка средней наработки до отказа имеет вид выражения (4.8):

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j \quad (4.8)$$

где N – количество работоспособных объектов при $t = 0$;
 τ_j – наработка до первого отказа каждого из объектов.

Формула (4.8) соответствует плану испытаний, при котором все объекты испытывают до отказа. Основным достоинством данного показателя надежности является его простота вычисления на основе экспериментальных статисти-

ческих данных. Но надо понимать, что величина T_l , как математическое ожидание случайной величины, не может полностью охарактеризовать время безотказной работы объекта, поэтому необходимо знать по крайней мере дисперсию времени отказа.

Гамма-процентная наработка до отказа – *наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах:*

$$P(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100} \quad (4.9)$$

где γ – заданное значение.

Задаваемые значения γ для критических отказов должны быть близки к уровню 100 %, чтобы сделать критические отказы практически невозможными событиями.

Для прогнозирования потребности в запасных частях, ремонтных мощностях, а также для расчета пополнения и обновления парка машин могут потребоваться гамма-процентные показатели при более низких значениях (например, при $\gamma = 50 \%$), что приближенно соответствует средним значениям. Статистические оценки для гамма-процентных показателей могут быть получены на основе статистических данных.

Наработка между отказами – *наработка объекта между двумя следующими друг за другом отказами.* Нарработка между отказами применима только к восстанавливаемым объектам.

Средняя наработка между отказами – *математическое ожидание наработки объекта между отказами.* Этот показатель применяется к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Объект на испытание работает до первого отказа; после чего производится его ремонт, и объект вновь ставится на испытание до

следующего отказа и т. д. Оценку средней наработки между отказами вычисляют по формуле (4.10):

$$\hat{T} = \frac{t}{r(t)} \quad (4.10)$$

где $r(t)$ – количество отказов, фактически произошедших за период суммарной наработки t .

Формула (4.10) допускает обобщение на случай, когда объединяют данные, относящиеся к группе однотипных объектов, которые эксплуатируют в статистически однородных условиях.

Гамма-процентная наработка между отказами – наработка между отказами, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Частота отказов (плотность распределения наработки до отказа) – это отношение числа отказавших объектов в единицу времени к первоначальному их количеству при условии, что вышедшие из строя объекты не восстанавливаются, то есть их число во время испытаний уменьшается:

$$f(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} = -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (4.11)$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших изделий за время $\Delta(t)$;

N_0 – первоначальное число испытываемых объектов;

Δt – интервал времени.

Достоинством этой характеристики является то, что имеется возможность судить по ее величине о числе отказавших объектов на каком-то промежутке времени. Преобразовав формулу (4.11), можно определить необходимое количество запасных частей:

$$n(\Delta t) = f(t) \cdot N_0 \cdot \Delta t \quad (4.12)$$

Частота отказов полно характеризует надежность объекта до первого отказа. Вышедшие из строя объекты в дальнейших испытания не участвуют. Типичная кривая изменения частоты отказов объекта во времени приведена на рисунке 4.2.

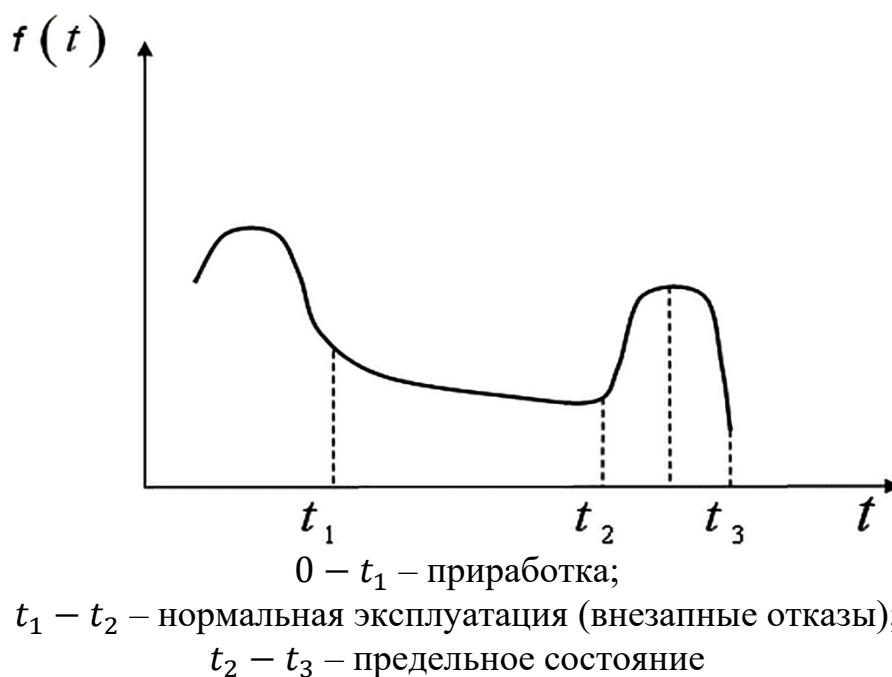


Рисунок 4.2 – График плотности распределения отказов во времени

Уменьшение частоты отказов на втором участке обусловлено не повышением надежности, а уменьшением общего числа испытываемых объектов. Кроме того, в период предельного состояния кривая имеет максимум, после чего частота отказов уменьшается, что объясняется опять же не повышением надежности в целом, а незначительным количеством исправно работающих к этому времени элементов.

Интенсивность отказов (мгновенная) – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Она представляет собой отношение числа отказавших объектов в единицу времени к числу объектов, безотказно проработавших до этого времени, при условии, что отказавшие

объекты не восстанавливались и не заменялись исправными. Другими словами, интенсивность отказов определяет, сколько еще может проработать объект, если он до сих пор не отказал. Статистическая оценка интенсивности отказов имеет вид выражения (4.13):

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N\Delta t} \quad (4.13)$$

где Δt – малый период наработки;

$n(t)$ – количество отказов, возникших с начального момента времени до достижения наработки t .

При этом разность $(n(t + \Delta t) - n(t))$ представляет собой количество отказов на отрезке Δt .

Интенсивность отказов связана с вероятностью безотказной работы и частотой отказов зависимостью (4.14):

$$\lambda = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} = \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} \quad (4.14)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы.

График интенсивности отказов (рис. 4.3), как и график частоты отказов, имеет три характерных участка:

- 1) до времени t_1 – приработка, когда интенсивность отказов повышена из-за отказов, обусловленных дефектами;
- 2) период $t_1 - t_2$ – нормальная эксплуатация (внезапные отказы);
- 3) период после t_1 – вход в предельное состояние, когда начинаются отказы из-за старения элементов, их интенсивного износа.

Интенсивность отказов – удобный показатель безотказности объекта, так как он упрощает многие расчеты.

Средняя интенсивность отказов – математическое ожидание мгновенной интенсивности отказов за заданный период времени.

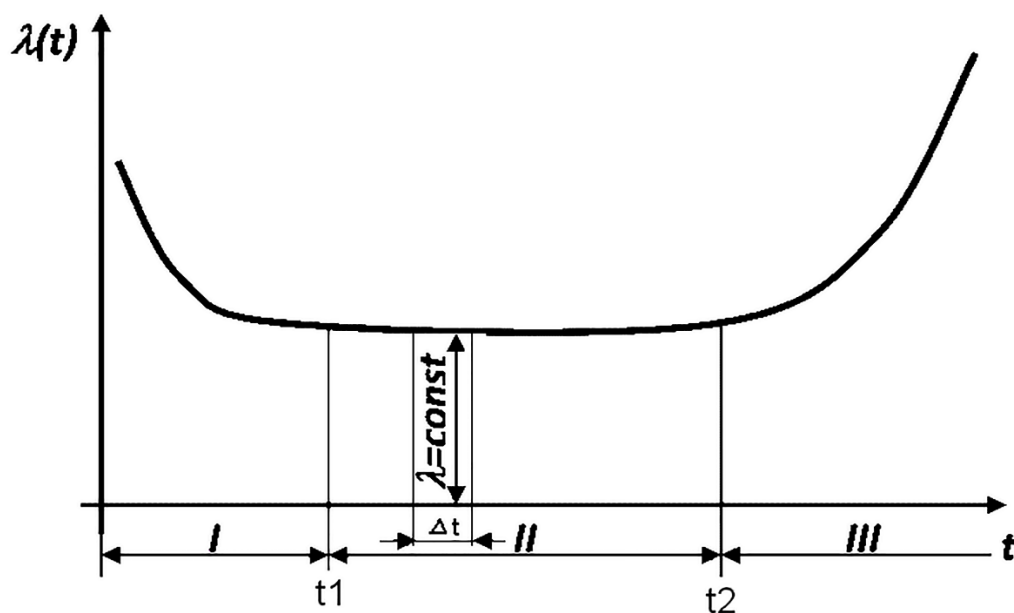


Рисунок 4.3 – График интенсивности отказов

Параметр потока отказов (мгновенный) – предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к продолжительности этого интервала, стремящейся к нулю. Он характеризует среднее число отказов ремонтируемого объекта в единицу времени. Потокотом отказов называется последовательность отказов, происходящих один за другим в случайные моменты времени. По результатам статистической информации параметр потока отказов определяется как отношение числа отказавших в единицу времени объектов к числу испытываемых объектов при их мгновенном восстановлении:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{r(t + \Delta t) - r(t)\}}{\Delta t} \quad (4.15)$$

где Δt – малый период наработки;

$r(t)$ – количество отказов, возникших с начального момента времени до достижения наработки t .

При этом разность $(r(t + \Delta t) - r(t))$ представляет собой количество отказов на отрезке Δt .

На рисунке 4.4 приведена зависимость изменения параметров потока отказов двигателя КамАЗ-740 в условиях эксплуатации в условиях г. Москвы.

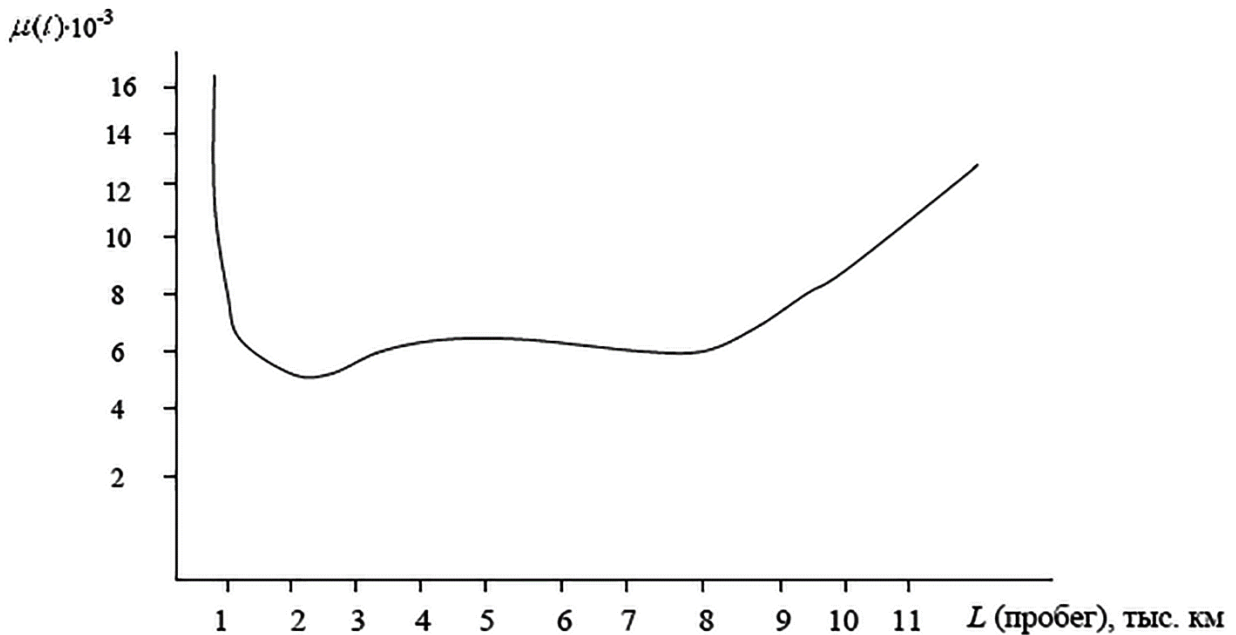


Рисунок 4.4 – Изменение потока отказов двигателя автомобиля КамАЗ-740 в условиях эксплуатации г. Москвы

Изменение параметра потока отказов $\mu(t)$ за время эксплуатации, как и изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$, делится на те же три периода; при этом период нормальной эксплуатации характеризуется примерно постоянным значением параметра $\mu(t)$ при неизменных условиях эксплуатации.

Средний параметр потока отказов – математическое ожидание мгновенного параметра потока отказов за заданный период времени:

$$\bar{\mu}(t) = \frac{E\{r(t_2) - r(t_1)\}}{t_2 - t_1} \quad (4.16)$$

Здесь рассматривается количество отказов за период $[t_1, t_2]$, причем:

$$t_1 \leq t \leq t_2$$

Оценку параметра потока отказов определяют по формуле (4.17):

$$\hat{\mu}(t) = \frac{r(t_2) - r(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (4.17)$$

Если поток отказов стационарный, то параметры, определяемые по формулам (4.15) и (4.16), не зависят от величины t .

Стационарный параметр потока отказов – предел мгновенного параметра потока отказов при стремлении рассматриваемого момента времени к бесконечности:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{\hat{T}} \quad (4.18)$$

где $\hat{T}$ – оценка средней наработки между отказами.

4.2.2 Показатели долговечности

Для оценки долговечности применяют показатели, характеризующие выход за допустимые пределы основных технических характеристик (мощность, скорость, точность, КПД и др.) или способность выполнять свои функции с допустимыми затратами на обслуживание и ремонт. К числу таких показателей относят срок службы и ресурс.

Ресурс – это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до момента достижения объектом предельного состояния.

Основное отличие этих понятий в том, что срок службы характеризует продолжительность существования объекта независимо от характера его использования, а ресурс – фактическую наработку. Рассмотрим разновидности ресурса и срока службы.

Средний ресурс до списания ($T_{\text{сп}}$) – средняя наработка однотипных объектов от начала эксплуатации (или возобновления после капитального ремонта) до списания, обусловленного наступлением предельного состояния.

Средний срок службы до списания – календарная продолжительность работы однотипных объектов от начала эксплуатации до списания, обусловленного наступлением предельного состояния.

Средний ресурс или средний срок службы до ремонта ($T_{др}$) – средняя наработка (или средняя календарная продолжительность эксплуатации) однотипных объектов от начала эксплуатации до первого ремонта.

Средний ресурс или средний срок службы между ремонтами ($T_{мр}$) – средняя наработка (или средняя календарная продолжительность эксплуатации) однотипных объектов между смежными ремонтами.

Наиболее доступным методом определения межремонтных ресурсов объектов является статистический. Обработав этим методом фактические данные о межремонтном ресурсе достаточного количества машин, эксплуатируемых в определенных почвенно-климатических условиях, можно установить величину ресурса.

При сборе данных следует особое внимание обращать на возрастной состав машин (выделяя при этом машины до первого ремонта и отремонтированные).

При массовой эксплуатации данной модели машин как в доремонтный, так и в межремонтный периоды их средний ресурс может быть определен из следующей зависимости:

$$\tau = \sum_{i=1}^k x_i \frac{n_i}{N_0} \quad (4.19)$$

где x_i – среднее значение наработки в каждом принятом интервале;

n_i – частота повторяемости в каждом принятом интервале;

N_0 – количество машин, за которыми ведется наблюдение;

k – количество принятых интервалов.

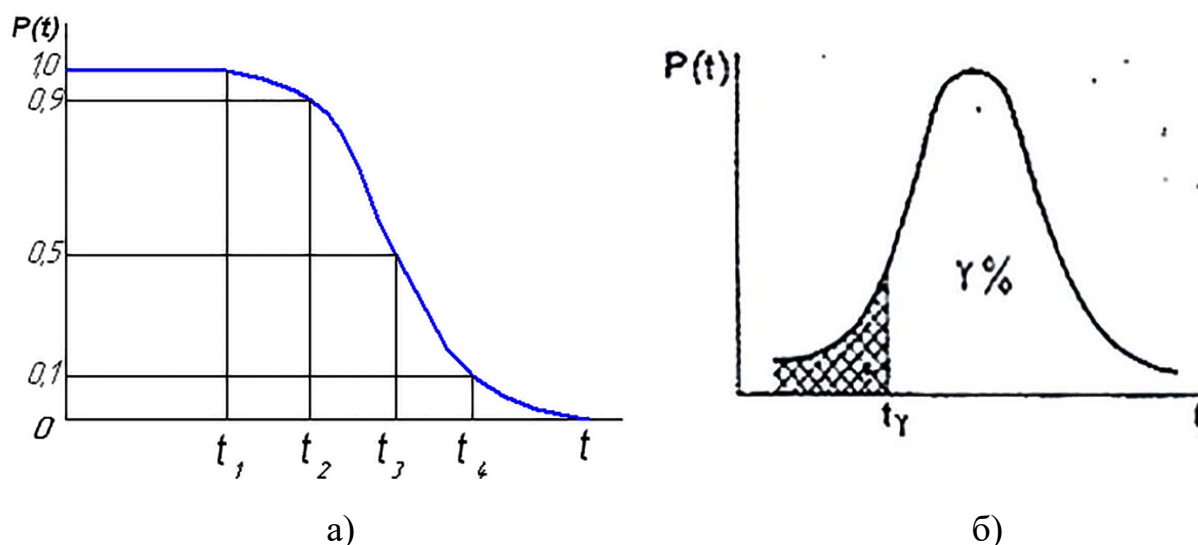
Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения объектом предельного состояния.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния. Данный показатель не является показателем надежности. По истечении назначенного ресурса объекта должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей документацией, о ремонте, списании, утилизации, оценке технического состояния, установлении нового назначенного ресурса.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния. Данный показатель также не является показателем надежности. По истечении назначенного срока службы объекта должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей документацией, о ремонте, списании, утилизации, оценке технического состояния, установлении нового назначенного срока службы и т. д.

Гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. Таким образом, гамма-процентный ресурс – это ресурс, которого достигает заранее заданное число однотипных объектов, сохраняя при этом работоспособное состояние. Число объектов, достигнувшее этого ресурса, выражается в процентах и обозначается буквой γ .

Заданный процент объектов γ – регламентированная вероятность. Например, при $\gamma = 90 \%$ соответствующий им ресурс называют 90-процентным. Значение гамма-процентного ресурса определяют с помощью кривых распределения ресурсов. На рисунке 4.5 (а) 90-процентный ресурс соответствует t_2 .



а) кривая убыли ресурсов; б) кривая распределения ресурсов

**Рисунок 4.5 – Функция вероятности безотказной работы
в зависимости от наработки объекта**

Гамма-процентный ресурс имеет большое практическое значение, так как долговечность техники – величина статическая, и ее значение имеет рассеивание из-за переменных нагрузок и изменяющихся условий эксплуатации. Определяется она экспериментально по данным о долговечности большой группы объектов. Например, средний доремонтный ресурс сельскохозяйственных тракторов и агрегатов должен достигать 6–8 тыс. мото-часов. При этом долговечность отдельных тракторов определенной марки может значительно превышать средний доремонтный ресурс. Это потребует завершения испытаний в хозяйственных условиях с исчерпыванием ресурса у всех наблюдаемых машин пяти и более лет.

Гамма-процентный ресурс как показатель долговечности позволяет значительно сократить время испытаний тракторов и агрегатов, так как испытания ведут до исчерпания ресурса у сравнительно небольшого количества (10–20 %) машин. При этом величина гамма-процентного ресурса соответственно равна $t_{\gamma 1} = 90\%$ и $t_{\gamma 2} = 80\%$. Чем больше установленная γ , тем меньше длитель-

ность испытаний. Однако для получения оценок ресурса с определенной регламентированной точностью при уменьшении длительности испытаний потребуется увеличить количество испытываемых объектов.

На основании гамма-процентного ресурса оценивают качество новых и отремонтированных машин и их агрегатов. Для тракторов, комбайнов и другой новой и отремонтированной сельскохозяйственной техники значение γ принято равным 80 % (γ 80 % машин ресурс при испытании должен превышать установленную величину $t_\gamma = 80$ %). Расчет 80-процентного ресурса проводят следующим образом. Вычисляют последовательно при каждой наработке t_i значения кривой убыли (вероятности безотказной работы) по формуле (4.20):

$$P(t_i) = \frac{N + 1 - i}{N + 1} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (4.20)$$

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течении которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

В какой-то мере долговечность характеризуется также показателями гарантийной наработки и срока гарантии.

Конкретные значения количественных показателей задают в зависимости от назначения, особенностей применения объектов и влияния отказов на безопасность работы. Для их установления проводят специальные расчеты на прочность, ресурсные испытания, а также используют результаты испытаний аналогов опытных образцов объектов.

4.2.3 Показатели ремонтпригодности и восстанавливаемости

Время (продолжительность) ремонта – время, затрачиваемое на выполнение ремонта объекта.

Время ремонта исключает технические, организационные задержки, а также задержки из-за обеспечения материальными ресурсами.

Время восстановления – время, затрачиваемое непосредственно на выполнение операций по восстановлению объекта.

Вероятность восстановления – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного значения.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления (работоспособного состояния объекта после отказа).

При наличии статистических данных о длительностях восстановления для ремонтируемых объектов среднее время восстановления t_B определяют по формуле (4.21):

$$t_B = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{n} \quad (4.21)$$

где t_{Bi} – время восстановления i -го отказа;

n – число обнаруженных и устраненных отказов объектов.

Если рассматривать подряд все промежутки t_i (в порядке возрастания индекса i), то эти величины можно определить как поток восстановления, имеющий чаще всего логарифмически нормальное распределение. В первом приближении поток восстановления можно считать простейшим параметром:

$$\omega_H = \frac{1}{t_B}$$

Гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью, выраженной в процентах.

Время до восстановления – время от момента отказа до восстановления работоспособного состояния объекта. Если момент отказа определить невозможно, время отсчитывается от момента обнаружения отказа.

Среднее время до восстановления – математическое ожидание времени до восстановления.

Гамма-процентное время до восстановления – длительность времени до восстановления, которая не будет превышена с вероятностью, выраженной в процентах.

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Средняя трудоемкость восстановления – математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

При этом затраты времени и труда на проведение технического обслуживания и ремонтов с учетом конструктивных особенностей объекта, его технического состояния и условий эксплуатации характеризуются оперативными показателями ремонтпригодности.

4.2.4 Показатели сохраняемости

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, остаются в пределах, установленных в документации.

По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным в документации. Требования к показателям безотказности, долговечности и ремонтпригодности для объекта, подвергнутого длительному хранению, должны указываться в техническом задании.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости, определяемое по формуле (4.22):

$$t_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (4.22)$$

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

На рисунке 4.6 90-процентный срок сохраняемости невосстанавливаемых объектов составляет τ_1 , а средний срок сохраняемости равен τ_2 . При хранении в течение срока τ_3 выходит из строя 80 % объектов.

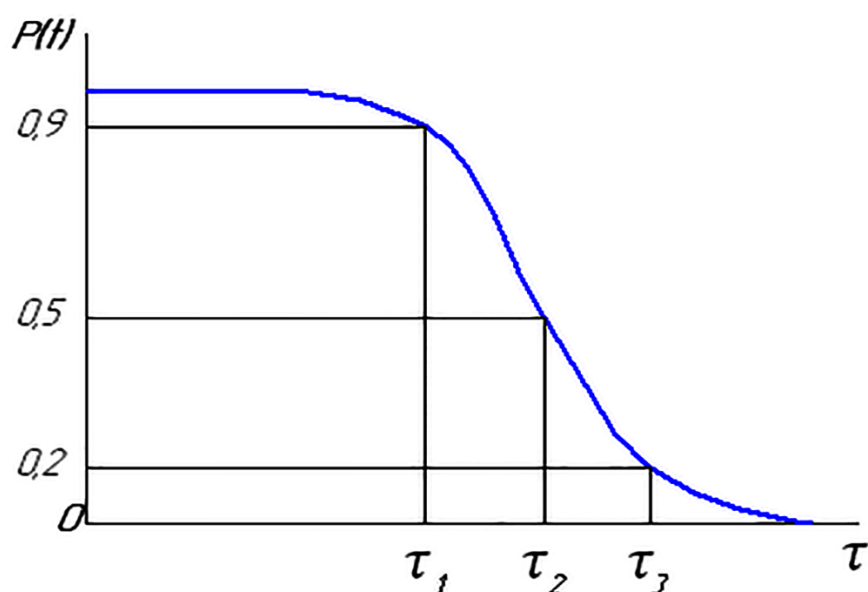


Рисунок 4.6 – Гамма-процентный срок сохраняемости на кривой убыви при хранении объектов

Эти показатели при необходимости включаются в нормативно-техническую документацию, но не заменяют срок хранения, который также указывают в технических требованиях на объект.

Назначенный срок хранения – календарная продолжительность, при достижении которой хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния. Данный показатель не является показателем надежности. По истечении назначенного срока хранения объекта должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей документацией, о ремонте, списании, утилизации, оценке технического состояния, установлении нового назначенного срока хранения и т. д.

4.3 Комплексные показатели надежности

Единичные показатели безотказности, включающие параметр потока отказов и наработку на отказ восстанавливаемых объектов, не учитывают время, затрачиваемое на восстановление. Поэтому эти показатели не дают возможности оценить готовность к выполнению заданных функций в нужное время. Для комплексной оценки надежности технических систем и эффективности технической эксплуатации в теории надежности используют коэффициенты готовности, оперативной готовности, технического использования и простоя.

Коэффициент готовности – вероятность того, что в данный момент времени объект находится в работоспособном состоянии, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

При порядке обслуживания, предусматривающим немедленное начало восстановления отказавшего объекта, данный коэффициент вычисляют по формуле (4.23):

$$K_{\Gamma} = \frac{t_{\text{ср}}}{t_{\text{ср}} + t_{\text{в}}} \quad (4.23)$$

где $t_{\text{ср}}$ – средняя наработка между отказами;
 $t_{\text{в}}$ – среднее время восстановления.

Таким образом, коэффициент готовности показывает долю, которую представляет время работы объекта от суммарного времени, расходуемого на работу и восстановление. Он характеризует одновременно два различных свойства объекта: безотказность и ремонтпригодность, поэтому называется комплексным показателем. Повышение данного коэффициента достигается либо увеличением среднего времени безотказной работы, либо уменьшением среднего времени восстановления.

Коэффициент неготовности – вероятность того, что объект в данный момент времени находится в неработоспособном состоянии, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного периода времени.

Данный коэффициент предусматривает необходимость внезапного использования выполнения объектом основных функций в течение времени t_p :

$$K_{ог} = K_{г} \cdot P(t_p) \quad (4.24)$$

где $P(t_p)$ – вероятность безотказной работы объекта в течении времени t_p , которая не зависит от момента начала работы t .

Коэффициент готовности характеризует готовность к применению по назначению только в отношении работоспособности объекта в произвольный момент времени. Он характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени.

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период:

$$K_{ти} = \frac{t_{сум}}{t_{сум} + t_{рем} + t_{обс}} \quad (4.25)$$

где $t_{сум}$ – суммарная наработка всех объектов;

$t_{рем}$ – суммарное время простоев из-за ремонта всех объектов;

$t_{\text{обс}}$ – суммарное время простоев из-за планового и технического обслуживания всех объектов.

Коэффициент технического использования – обобщенный комплексный показатель надежности и более полной характеристики ремонтпригодности, чем коэффициент готовности, так как учитывает все простои, связанные с ТО и ремонтом объекта. Данный показатель характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

Коэффициент вынужденного простоя – вероятность неработоспособного состояния восстанавливаемого объекта с конечным временем восстановления. Коэффициент определяется как отношение времени нахождения объекта в ремонте к сумме времени исправной работы и времени нахождения в ремонте (4.26):

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{в}} + t_{\text{сп}}} = 1 - K_{\Gamma} \quad (4.26)$$

Коэффициент сохранения эффективности – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

Коэффициент сохранения эффективности характеризует степень влияния отказов на эффективность применения объекта по назначению. Для каждого конкретного типа объектов содержание понятия эффективности и точный смысл ее показателей задаются техническим заданием и вводятся в нормативно-техническую или конструкторскую документацию. В общем виде, значения показателя сохранения эффективности можно определить по следующей зависимости (4.27):

$$K_{\text{эф}} = \frac{W(P)}{W} \quad (4.27)$$

где $W(P)$ – значение показателя эффективности изделия с учетом значений соответствующих показателей надежности (например, при значении вероятности безотказной работы, равной P);

W – значение показателя эффективности изделия без учета характеристик надежности.

4.4 Экономические показатели надежности

Экономические показатели при оценке надежности весьма важны, поскольку повышение безотказности и долговечности машин, с одной стороны, связано с дополнительными материальными затратами на производство; а, с другой, – с уменьшением затрат общественного труда на ремонт и обслуживание техники, с устранением потерь от простоя машин в ремонте.

Показателем надежности с экономической точки зрения может служить **коэффициент экономичности** – сумма затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией машины, отнесенная к длительности ее эксплуатации:

$$K_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{и}} + Q_{\text{э}}}{T_{\text{э}}} \quad (4.28)$$

где $Q_{\text{и}}$ – стоимость изготовления новой машины, руб.;

$Q_{\text{э}}$ – суммарные затраты на эксплуатацию, ремонт и обслуживание машины, руб.;

$T_{\text{э}}$ – период эксплуатации, ч.

Следует стремиться к минимизации коэффициента экономичности.

Коэффициент эксплуатационных издержек показывает соотношение между стоимостью изготовления и эксплуатацией:

$$K_{\text{из}} = \frac{Q_{\text{и}}}{Q_{\text{и}} + Q_{\text{э}}} \quad (4.29)$$

Более высокая надежность достигается за счет дополнительных затрат. В связи с этим часто используют показатель **цены надежности**.

Для прогнозирования затрат на повышение надежности применяют метод сравнения с прототипом на основании общих эмпирических зависимостей следующего типа (4.30):

$$Q_n = Q_{но} \left(\frac{T_0}{T} \right)^\alpha \quad (4.30)$$

где $Q_{но}$ – цена надежности аналога или прототипа;

T_0, T – наработка на отказ прототипа и проектируемого изделия;

α – эмпирический показатель, характеризующий уровень прогрессивности производства с точки зрения возможностей заданного повышения надежности изделия (равен 0,5–1,5).

Контрольные вопросы

1. Что такое показатель надежности?
2. Какие существуют показатели безотказности?
3. Какие существуют показатели долговечности?
4. Какие существуют показатели ремонтпригодности?
5. Какие существуют показатели сохраняемости?
6. Какие известны комплексные показатели надежности?
7. Какие известны экономические показатели надежности?

ЛЕКЦИЯ 5.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

5.1 Причины нарушения работоспособности

Любая машина в процессе эксплуатации подвергается различным воздействиям, в результате чего происходит отклонение ее параметров от номинала, что выражается в изменении зазоров и натягов, свойств материалов, нарушении исходных регулировок механизмов, ослаблении креплений. Все процессы, происходящие в машине, можно представить как обратимые и необратимые.

К обратимым относятся процессы, которые временно изменяют параметры машины, например, упругая деформация. К необратимым – такие, в результате которых ухудшаются технические характеристики (изнашивание, коррозия, коробление и т. д.). Изменение характеристик машин зависит от многих факторов, которые действуют на нее комплексно, находясь в сложной зависимости друг от друга.

К внутренним факторам относят несовершенство конструкции машин (физико-механические свойства материалов, используемых для изготовления деталей), технологии их изготовления или ремонта.

Внешние факторы бывают объективные и субъективные. К **объективным** относятся климатические условия (температура, влажность), запыленность воздуха, вид трения, скорость относительного перемещения трущихся поверхностей, величина давления на поверхности, вид и качество смазки и др. При эксплуатации машин в зимний период, особенно во время пуска двигателей, поступление загустевшей смазки к трущимся поверхностям затруднено, что приводит к ускоренному изнашиванию деталей. Повышенная

температура воздуха в летний период вызывает перегрев двигателя, а следовательно, уменьшение вязкости смазочного материала и толщины масляной пленки на трущихся поверхностях, что ведет к появлению задиров.

Высокая влажность воздуха, наличие в нем паров ядохимикатов и удобрений ускоряют коррозионные процессы. Значительная запыленность воздуха увеличивает опасность проникновения абразивных частиц в цилиндры двигателя, в топливо и смазочные материалы, что может увеличить скорость изнашивания деталей.

Существенное влияние на долговечность сельскохозяйственных машин оказывают свойства почвы и растений. Повышение сопротивления при обработке растительной массы в 3–5 раз увеличивает нагрузки на агрегаты машин, возрастает число отказов.

К субъективным факторам относят уровень технического обслуживания и ремонта, квалификацию обслуживающего персонала, соблюдение правил эксплуатации и хранения. Несвоевременные и некачественные ТО и ремонты не только не устраняют нежелательные явления, но и могут усиливать их. Из-за нарушения правил эксплуатации могут возникнуть различные дефекты: изгибы и скручивание деталей, задиры на рабочих поверхностях, трещины, сколы и т. д.

При работе машины на нее действуют все виды энергий. Повреждение деталей сельскохозяйственной техники происходит в результате:

1) *действия физического поля (среды)*: силового, теплового, электрического, магнитного, звукового и светового;

2) *действия химического поля*: действия поверхностно-активных веществ и химически активных веществ;

Как правило, на детали машин, действуют совместно физическое и химическое поля. Например, при нагружении стале трением, силовое поле способ-

ствует образованию теплового, звукового и электромагнитного полей, которые, в свою очередь, ускоряют химические реакции, разрушающие детали. Под разрушением понимается всякий протекающий в материале или на его поверхности процесс, приводящий к тому, что элемент объекта больше не может выполнять свои функции.

Физические поля могут проявляться в виде статических и динамических нагрузок, а также деформации из-за внутренних напряжений и изменения объема деталей после термической обработки. Вредное воздействие на неработающие машины оказывают длительные статические нагрузки. Именно поэтому в некоторых случаях наблюдают деформацию рам, платформ, пальцевых режущих аппаратов у машин, не установленных в горизонтальное положение на подставки. Статические нагрузки испытывают также различные пружинные механизмы. При длительном хранении пружины необходимо ослабить, чтобы они не потеряли своей упругости (вывешивание автомобиля на подставках, чтобы разгрузить рессоры).

Тепловая энергия воздействует на детали при прогреве двигателя, нагреве самих деталей из-за трения, а также когда колеблется температура окружающей среды. Если же среда агрессивна, то большое влияние оказывают химические процессы, ведущие к коррозии и разрушению деталей. При длительном хранении от коррозии, структурных превращений и остаточной деформации от собственной массы машины, качество материала деталей изменяется.

Под действием атмосферных осадков, резких перепадов температур, солнечного излучения материалы стареют. У полимерных и резино-текстильных материалов снижается эластичность, повышается твердость, уменьшается сопротивление сжатию и изгибу. При совместном воздействии озона и солнечных лучей резина разрушается наиболее интенсивно. Смазочные материалы, попавшие на резино-текстильные детали, вызывают разбухание резины. Поэтому не подготовленные к хранению резиновые шины, прорезиненные ремни и другие

детали быстро выходят из строя. Из-за нарушения правил хранения срок службы пневматических шин может снижаться в среднем на 10–15 % в год.

Всякое отклонение рабочих характеристик от нормальных является сигналом о наличии в машине неисправности. В основном неисправность сопряжений проявляется в нарушении посадки, то есть нарушении заданных зазоров, натягов. Например, падение мощности двигателя может быть следствием увеличения зазоров в деталях поршневой группы.

5.2 Сущность трения

Основной причиной износа и повреждения деталей машин, а также потери мощности является внешнее трение.

Внешнее трение – это явление сопротивления относительно перемещению тел, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

Сила трения – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами.

Различают следующие **виды трения**:

1. Трение покоя – трение двух тел при микросмещениях без макросмещения. То есть это сила, возникающая между двумя контактирующими телами, которая препятствует появлению относительного движения. Возникает она при микроперемещениях (например, при деформации) контактирующих тел и действует в направлении, противоположном возможному перемещению. Чтобы привести два тела в движение необходимо преодолеть эту силу. Трение покоя больше, чем трение движения.

2. Трение движения – это трение двух тел, находящихся в движении относительно друг друга.

3. Трение скольжения – *трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению и (или) направлению.* Таким образом, это сила, возникающая при поступательном перемещении одного из контактирующих тел относительно другого и действующая на это тело в направлении, противоположном направлению скольжения.

4. Трение качения – *трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел одинаковы по значению и направлению, по крайней мере в одной точке зоны контакта.* Тем самым это трение, возникающее при перекатывании круглого тела по поверхности другого тела. Обычно сила трения качения примерно в сто раз меньше силы трения скольжения.

5. Трение качения с проскальзыванием – *трение движений двух соприкасающихся тел при одновременном качении и скольжении в зоне контакта, то есть с буксованием.*

6. Трение без смазочного материала – *трение двух тел при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.* Особо опасным считают трение ювенильных поверхностей (поверхностей обнаженного чистого металла без оксидных пленок). Оно относится к трению без смазочного материала и характеризуется непосредственным взаимодействием между твердыми телами при отсутствии между ними третьей фазы (например, оксидной пленки), способной выполнять смазочную функцию.

Металлическая поверхность может сохранять ювенильные свойства лишь в условиях высокого вакуума или в атмосфере инертного газа, что встречается при износе деталей в случаях, когда отделяются оксидные пленки и твердые тела вступают в непосредственный контакт. Такое явление наиболее часто имеет место при трении деталей из однородных материалов, например, сталь по стали.

7. Трение со смазочным материалом – *трение двух тел при разделении их поверхностей смазочным материалом любого вида.*

8. Смешанное трение – имеет место, когда область контакта содержит участки сухого и жидкостного трения.

На силу трения влияют следующие факторы:

- 1) площадь фактического контакта трущихся тел;
- 2) скорость относительного перемещения;
- 3) физико-механические характеристики материала трущихся тел (модуль упругости, коэффициент теплопроводности, твердость, пластичность и др.);
- 4) микронеровность трущихся тел и ее направления;
- 5) состав и влажность воздуха;
- 6) свойства смазки.

Сила трения возникает обычно при действии нормальной нагрузки. Причина внешнего трения твердых тел: шероховатость соприкасающихся поверхностей, взаимное притяжение молекул этих поверхностей и действие на них физического и химического полей. Таким образом, трение является результатом сочетания различных видов взаимодействия: механических, физических, химических, электрических и других процессов, возникающих при контактировании и относительном перемещении тел. Интенсивность этих процессов может быть различна в зависимости от свойств трущихся материалов и физико-химического влияния среды. Поэтому взаимодействие тел при трении не может быть описано простым законом.

Проблемы трения, изнашивания и смазывания изучает наука **трибология**, базирующаяся на фундаментальных законах физики, химии, механики сплошных сред, термодинамики и материаловедения. Различают пять теорий, объясняющих процессы, происходящие при трении.

Механическая теория была предложена в 1699 г. Амонтоном, который сформулировал закон для случая сухого трения:

$$F = f_{\text{ск}} \cdot P \quad (5.1)$$

где $f_{\text{ск}}$ – коэффициент трения скольжения;

P – нормальная нагрузка к плоскости трения, Н.

Сближение шероховатых поверхностей приводит как к контакту микронеровностей, так и к взаимному проникновению микровыступов одной из поверхностей во впадины другой. В связи с различной высотой микронеровностей контактирующие микровыступы нагружаются по-разному, поэтому одни из них испытывают упругие деформации, другие – пластические. При относительном перемещении трущихся поверхностей появляются все известные виды деформаций: смятие, сдвиг, изгиб.

Важно отметить, что трущиеся детали соприкасаются не всей видимой поверхностью, а лишь микровыступами, пятнами касания. По подсчетам английского ученого Боудена, фактическая площадь касания составляет величину 0,01–0,001 от видимой поверхности в зависимости от класса шероховатости. Поэтому удельные нагрузки на отдельные микровыступы достигают больших значений.

Например, если в подшипниках коленчатых валов автотракторных двигателей среднее расчетное давление составляет 4 МПа, то фактическое давление на микровыступах может достигать от 400 до 4 000 МПа. При таком давлении в контактных точках возникают температурные вспышки локального характера (равные 1 000 °С) и происходит сваривание микровыступов с почти мгновенным разрывом мостиков сварки.

Такой характер износов подтверждается на практике в виде задиров и наплывов на трущихся поверхностях. С течением времени фактическая площадь касания увеличивается. Идет процесс приработки. В период приработки происходит «перемалывание» старых микронеровностей, полученных при механической обработке, с образованием новых. Значительная часть работы трения (70–80 %) переходит в теплоту, поэтому температура на поверхностях трения резко возрастает.

Механическая теория объясняет причину возникновения трения зацеплением шероховатостей трущихся поверхностей, но не объясняет увеличение трения у очень гладких поверхностей, а также тот факт, что чисто обработанные поверхности в процессе трения и изнашивания приобретают определенную шероховатость. Также из нее неясно, почему твердые поверхности изнашиваются при контакте с мягкими.

Молекулярная теория трения. Она была предложена в XVIII веке и далее развита Томпсоном (1929 г.) и Б. В. Дерягиным (1934 г.):

$$F = f_{\text{ск}} \cdot (P + p \cdot S) \quad (5.2)$$

где p – добавочное давление, вызванное силами ионно-атомного притяжения, МПа;

S – площадь контакта, м².

Эта теория исходит из существования молекулярных сил взаимодействия между контактирующими микровыступами. Факт существования молекулярной адгезии можно увидеть из эмпирической формулы Кулона (5.3), полученной им в 1799 г.:

$$F = f_k \cdot P + A \quad (5.3)$$

где f_k – коэффициент трения качения;

A – сила сопротивления проскальзыванию из-за адгезии, Н.

Из формулы (5.3) следует, что при нормальной нагрузке равной нулю, поверхности трения все-таки взаимодействуют, так как сила трения при этом больше нуля ($P = A$).

В соответствии с молекулярной теорией трения, на отдельных участках трущихся поверхностей молекулы настолько сближаются, что начинает проявляться взаимодействие молекулярных сил, аналогичное притяжению разноименных зарядов. Результат молекулярного взаимодействия между трущимися телами – износ чисто обработанных поверхностей.

Молекулярно-механическая теория, предложенная И. В. Крагельским в 1946 г. более полно отражает физическую сущность явлений трения и изнашивания:

$$F = F_{\text{мех}} + F_{\text{мол}} = a \cdot S_{\text{ф}} + b \cdot P \quad (5.4)$$

где $F_{\text{мех}}$, $F_{\text{мол}}$ – составляющие силы трения (механическая и молекулярная);

$S_{\text{ф}}$ – фактическая площадь контакта;

P – удельное давление;

a и b – коэффициенты, устанавливаемые опытным путем.

Эта теория исходит из предположения, что трение имеет двойственную природу и обусловлено как взаимным внедрением микровыступов трущихся поверхностей, так и силами молекулярного взаимодействия. С учетом влияния на процесс изнашивания вида трения, теория является общепризнанной.

Энергетическая теория предложена в 1952 г. Дубининым. Согласно этой теории природа трения и процессы, происходящие при нем, должны подчиняться не законам сил, а законам энергий и их превращения. Энергетическая теория трения и износа базируется на физико-химических явлениях, из которых следует, что процесс трения один, но эффекты, связанные с ним, могут быть различны и зависят от многих факторов.

Качественно процесс трения характеризуется физико-химическими явлениями, а количественно – механическим эффектом (коэффициентом и силой трения, а также износом поверхности).

Гидродинамическая теория исследована Н. А. Петровым (1883 г.), Н. Е. Жуковским (1886–1889 гг.), Чаплыгиным (1897–1896 гг.), Ренольдсом (1886 г.), Зоммерфельдом (1931 г.) и др. Она разработана на основе гидродинамической теории смазки Петрова:

$$F = h \cdot n \cdot \frac{S}{a} \quad (5.5)$$

где F – сила вязкого сдвига в нагруженной части подшипника, Н;

h – абсолютная вязкость масла, Па·с;

n – относительная скорость перемещения трущихся поверхностей, м/с;
 S – площадь поверхности скольжения, м²;
 a – толщина масляного слоя, м.

5.3 Явления при трении и изнашивании

В процессе трения и изнашивания могут возникать следующие явления:

1. Схватывание – явление местного соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении.

2. Перенос материала – явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго.

3. Заедание – процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала. Заедание может завершаться прекращением относительного движения.

4. Задир – повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения.

5. Царапание – образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц.

6. Отслаивание – отделение с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании.

7. Выкрашивание – образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании.

8. Приработка – процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

5.4 Способы смазки трущихся поверхностей

Смазочный материал – материал, вводимый на поверхность трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания.

Смазывание – подведение смазочного материала к поверхности трения.

Смазка – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшаются износ, повреждения поверхностей и силы трения. Существуют следующие виды смазки:

1. Газовая, жидкостная и твердая смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей осуществляется газовым, жидким или твердым смазочным материалом. Твердыми смазочными материалами являются, например, графит, а также некоторые мягкие металлы и сплавы (баббиты).

2. Гидродинамическая и газодинамическая смазка – жидкостная и газовая смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое жидкости или газа при относительном движении поверхностей. Один из примеров – масляный клин под шейкой коленчатого вала, или водный клин под колесом автомобиля, въехавшего в лужу.

3. Гидростатическая и газостатическая смазка – жидкостная и газовая смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате поступления жидкости или газа в зазор между поверхностями под внешним давлением (например, от масляного насоса двигателя).

4. Граничная смазка – смазка, при которой трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличными от объемной вязкости. При граничной смазке трущиеся поверхности разделяются тонким адсорбционным слоем смазочного материала. На поверхности

металла молекулы ПАВ образуют монослой – молекулярный ворс. Разъединение трущихся поверхностей только двумя монослоями в 6–7 раз снижает величину коэффициента трения. Слоев молекул может быть несколько; обычно толщина граничного слоя меньше 0,1 мкм. Граничная смазка может существовать самостоятельно, но главным образом она входит в полусухую и полужидкостную смазки.

5. Полужидкостная (смешанная) смазка – смазка, при которой осуществляется частично гидродинамическая, частично граничная смазка. Некоторые участки трущейся пары работают в режиме жидкостного трения, а другие – в режиме граничного. Примером такой смазки могут служить среднескоростные подшипники скольжения и закрытые зубчатые передачи.

6. Полусухая смазка, при которой на некоторых участках трущихся поверхностей протекают процессы сухого, а на других – граничного трения. В режиме полусухого трения могут работать трущиеся пары тормозов при загрязнении поверхностей следами масел.

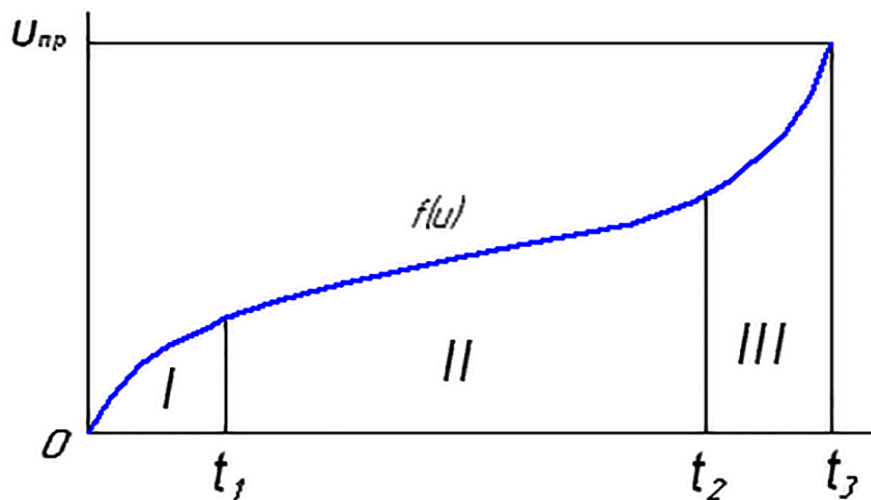
5.5 Понятие об износе и изнашивании

Ранее говорилось, что основной причиной выхода из строя деталей машин является трение. Трение приводит к изнашиванию поверхности деталей.

Изнашивание – это процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела или накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров или формы.

Износ – это результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. По статистике более 80 % деталей машин выходят из строя в результате износа.

Естественный износ возрастает с увеличением продолжительности работы. Появление износа до определенного момента не влечет за собой качественных изменений механизмов в работе. На рисунке 5.1 представлена кривая нарастания износа.



I – участок приработки; II – участок нормальной работы;
III – участок интенсивного изнашивания

Рисунок 5.1 – Кривая нарастания износа

Встречающиеся в рабочих механизмах любой машины износы и дефекты могут быть подразделены на две основные группы:

1. Износы и дефекты, медленно нарастающие и являющиеся следствием длительной работы сил трения, воздействия высоких температур и других факторов при нормальных условиях эксплуатации, то есть когда соблюдаются все требуемые для данного механизма правила ухода за ним – естественные (постепенные) износы.

2. Аварийные (внезапные) износы, нарастающие быстро и наблюдаемые иногда после непродолжительной работы машины. Они являются следствием неправильного ухода и в редких случаях – результат дефекта производства.

Процесс изнашивания характеризуется следующими показателями:

1. Скорость изнашивания – отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник. Различают мгновенную (в определенный момент времени) и среднюю скорость изнашивания (за определенный интервал времени).

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

3. Износостойкость – свойство материалов оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Оно оценивается величиной обратной скорости изнашивания или его интенсивности.

5.6 Классификация видов изнашивания

Как уже отмечалось, вид изнашивания обуславливается внешними факторами (родом трения, скоростью относительного перемещения трущихся поверхностей, величиной давления на поверхность, видом смазки) и внутренними, связанными со свойствами материалов трущихся деталей (пределом текучести и прочности, твердостью, тепловой и химической стойкостью).

Согласно ГОСТ 27674–88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения», изнашивание деталей подразделяется на основные группы:

- 1) механическое (абразивное, усталостное, эрозионное, кавитационное);
- 2) молекулярно-механическое (изнашивание при заедании);
- 3) коррозионно-механическое (окислительное изнашивание, изнашивание при фреттинг-коррозии).

Механическое изнашивание – это изнашивание в результате механических воздействий.

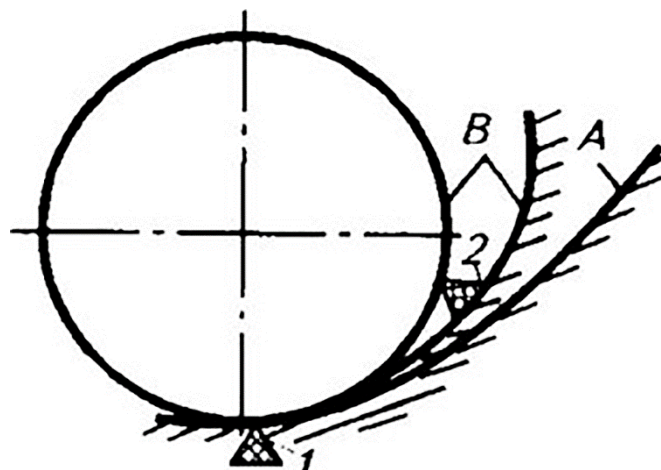
Абразивное изнашивание – механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых частиц. Частицы

могут находиться в свободном или закрепленном состоянии. Твердые частицы содержатся в почве, пыли, а также могут образовываться в самой машине в виде продуктов износа трущихся деталей. Такое изнашивание является главным фактором, ограничивающим ресурс сельскохозяйственных машин. Абразивному изнашиванию сильно подвержены плужные лемеха, культиваторные лапы, бороны, детали ходовой части гусеничных тракторов и т. д.

Гидроабразивное и газоабразивное изнашивание – *изнашивание в результате воздействия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа*. Гидроабразивному изнашиванию подвержены плунжерные пары, форсунки топливной аппаратуры, трубопроводы; газоабразивному – выпускные клапана, выпускной коллектор, турбины, крыльчатки дымососов в котельных.

Интенсивность абразивного изнашивания особенно велика у машин, эксплуатируемых в запыленной атмосфере при недостаточной герметичности уплотнений. Двигатель с неисправным воздухоочистителем через несколько часов теряет компрессию и выходит из строя в результате форсированного износа поршневых колец и зеркала цилиндров. Накопление пыли в смазочном материале до уровня 0,25 % по массе приводит к отказу подшипников качения за 1 000 мото·ч при нормативной долговечности в 10 раз большей.

Абразивное изнашивание может протекать в двух формах: *механической, при которой происходит снятие микростружки; и механохимической, при которой происходит пластическое деформирование поверхностных объемов, их окисление и последующее разрушение образующихся пленок*. Обычно абразивное изнашивание связывают лишь с режущим действием абразивных частиц. С этим представлением связан и сам термин «абразивный», происходящий от латинского *abrasio* – соскабливание. При таком подходе процесс изнашивания соединения «вал – подшипник» можно представить в виде схемы (рис. 5.2).



A – мягкая поверхность, *B* – твердая поверхность; 1 и 2 – абразивные частицы

Рисунок 5.2 – Схема абразивного изнашивания соединения «вал – подшипник»

Абразивные частицы по-разному ведут себя в зависимости от твердости поверхностей сопряженных деталей. Когда одна из трущихся поверхностей (*A*) изготовлена из мягкого материала, абразивные частицы поглощаются этой поверхностью, что при малой их концентрации в масле предохраняет твердую поверхность (*B*) от износа. Со временем мягкая поверхность насыщается абразивными частицами и превращается в своеобразный абразивный инструмент, который царапает сопрягаемый с ней вал.

Если обе соединенные поверхности (*B*) имеют значительную твердость, то абразивные частицы 2, попадая в зазор между ними, царапают их, либо разрушаются сами, не повреждая ни ту, ни другую поверхность. Это зависит от соотношения твердостей поверхностей и абразива.

Степень агрессивности абразивных частиц по отношению к изнашиваемым поверхностям **оценивают коэффициентом твердости:**

$$K_T = \frac{H}{H_a} \quad (5.6)$$

где *H* – микротвердость материала детали;

H_a – микротвердость абразива.

Критическое значение коэффициента твердости находится в пределах от 0,5 до 0,7. При его значении, меньшем 0,5, происходит интенсивное абразивное изнашивание, а при значении, большем 0,7, сопротивление материала абразивному изнашиванию резко возрастает.

Однако, твердость не может однозначно характеризовать сопротивление материала абразивному изнашиванию. Здесь оказывают влияние также прочностные и деформационные свойства. Деформационными свойствами объясняется неожиданное поведение мягких пластичных материалов в условиях абразивного изнашивания, которые вполне удовлетворительно сопротивляются воздействию абразивных частиц. Напряжения в месте контакта абразивных частиц с пластмассами оказываются значительно меньшими по сравнению с напряжениями на контактах тех же частиц с металлами. Это приводит к тому, что для разрушения пластмассовой поверхности требуются значительно большие усилия, чем для разрушения металла.

Снизить интенсивность абразивного изнашивания можно следующими способами:

1) *защита поверхностей трения;* для уменьшения абразивного изнашивания необходимо предотвратить попадание абразивных частиц на трущиеся поверхности с помощью уплотнений, воздушных и масляных фильтров, а также тщательной очистки агрегатов и деталей машин при ремонте;

2) *повышение износостойкости;* для придания трущимся поверхностям наибольшего сопротивления абразивному изнашиванию применяют специальные виды наплавки и гальванических покрытий, например, хромирование; в этих же целях наряду с известными видами термической обработки (цементации, закалки и др.) в ремонтном производстве применяют термомеханическую и электромеханическую обработки;

3) облицовывание металлических поверхностей пластмассами и резиной; этот способ вытекает из механизма взаимодействия пластмасс с твердыми частицами, когда проявляются деформационные свойства полимерного материала; характерный пример такой защиты – изготовление поддерживающих роликов с резиновыми бандажами на гусеничных тракторах.

Усталостное изнашивание – механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя.

Оно приводит к возникновению трещин и отделению частиц в виде чешуек. Этот вид изнашивания проявляется только через некоторый период работы детали. Чаще всего он наблюдается при трении качения с проскальзыванием, когда контакт деталей сосредоточенный и зависит от удельных давлений в сопряжении, частоты циклов нагрузки и свойств металла. Механизм этого изнашивания определяет процессами повторной пластической деформации, упрочнением и разупрочнением металла в поверхностных слоях.

На твердых поверхностях деталей усталостное изнашивание носит характер хрупкого разрушения, возникают местные глубокие впадины и трещины. А усталостное изнашивание мягких поверхностей резко изменяет форму деталей за счет больших пластических деформаций. Поверхностное выкрашивание является типичным видом усталостного изнашивания рабочих поверхностей подшипников качения, роликов цепей, зубчатых колес и кулачков.

Кавитационное изнашивание – механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное высокое ударное давление или высокую температуру.

Кавитация возникает там, где нарушается сплошность потока жидкости, в результате чего образуются пустоты и полости, заполненные воздухом или

паром низкого давления. Попадая с потоком жидкости в область более высокого давления, пустоты (каверны) захлопываются, образуя ударную волну. Если это происходит у поверхности детали, жидкость с большой скоростью ударяется о поверхность (гидравлический удар). При наложении на поверхность металла большого количества таких ударов образуются очаги разрушения. Например, у двигателя СМД-14 через 700–800 часов работы при температуре воды в рубашке охлаждения 55–60 °С гильза толщиной 7 мм пробивается насквозь. Кавитационному разрушению подвержены также лопасти водяных насосов, элементы гидропривода и гребные винты.

Для устранения воздействия кавитации в автотракторных двигателях необходимо:

- 1) уменьшить вибрацию гильз;*
- 2) создать повышенное давление в системе охлаждения;*
- 3) поддерживать постоянную температуру воды (равную 75 °С) в рубашке охлаждения.*

Также можно подбирать более стойкие материалы для изготовления гильз, применять различные покрытия для поверхностей или добавлять в воду специальные присадки поверхностно-активных веществ (растворимые масла или эмульсоид КД).

Изнашивание при фреттинге – механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении.

Изнашивание при заедании (адгезионное изнашивание) – изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникающих неровностей на сопряженную поверхность.

Механизм изнашивания состоит в том, что в процессе трения в местах контакта происходит пластическая деформация и разрушаются оксидные

пленки. При тесном сближении поверхностей возникает междуатомное притяжение металлов, образуются металлические связи и происходит схватывание. Образовавшиеся узлы схватывания разрушаются при перемещении поверхностей; при этом на одной поверхности образуется «углубление», на другой – «выпуклость». Существует две разновидности этой формы изнашивания – схватывание первого и второго рода.

Схватывание первого рода возникает при трении скольжения с малыми скоростями поверхностей и при удельных давлениях, превышающих предел текучести материала, при отсутствии смазки и защитной пленки окислов. Ему подвержены, например, плунжерные пары.

Схватывание второго рода (тепловое) возникает при трении скольжения с большими скоростями и давлениями, при которых происходит нагрев трущихся поверхностей до температуры размягчения металла, что приводит к образованию металлических связей (свариванию) деталей. Затем происходит разрушение поверхностей в виде вырывов, налипания и смятия. Изнашиванию такого рода подвержены детали тяжело нагруженных быстроходных машин: вкладыши подшипников, поршни двигателей внутреннего сгорания, валки горячей прокатки, штампы для горячей штамповки, прессформы для литья под давлением. Методы борьбы с ним: уменьшение предельных нагрузок, упрочнение, смазка, эксплуатация с оптимальными зазорами.

Коррозионно-механическое изнашивание – изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой.

Окислительное изнашивание – коррозионно-механическое изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой. При окислительном изнашивании кислород воздуха, вступая во взаимодействие с металлом, образует на нем оксид-

ную пленку. При трении оксидные пленки постепенно истираются или, отрываясь, удаляются со смазкой. Затем пленки образуются вновь. Окислительное изнашивание возникает при трении скольжения и трении качения. При трении скольжения окислительный износ, как правило, бывает ведущим. При трении качения окислительный износ может сопутствовать усталостному износу и при нормальных нагрузках также является ведущим.

Интенсивность окислительного изнашивания меньше, чем других видов износа и составляет 0,1–0,5 мкм/час. Подвижные пленки перемещаются по поверхности трения и заполняют ее впадины и неровности, в результате уменьшается шероховатость и увеличивается твердость. В зависимости от формы окислительного изнашивания поверхности детали могут стать блестящими, полированными или матовыми (поршневой палец двигателя, кольцо подшипника качения). Окислительному изнашиванию, как правило, сопутствует абразивное.

Изнашивание при фреттинг-коррозии – это коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях. Повреждения поверхностей при нем имеют вид язвин, заполненных продуктами разрушения. Для развития процесса достаточны смещения участков сопряженных поверхностей от 1 до 100 мкм. Такие колебания могут вызываться вибрациями, периодическим изгибом или скручиванием сопряженных деталей, а также возвратно-поступательным перемещением. Поэтому этот вид изнашивания можно наблюдать как в малоподвижных узлах машин (шлицевые валы), так и в неподвижных соединениях в местах посадки (вал – кольцо шарикоподшипника, болтовые и заклепочные соединения, а также пружины).

Механизм фреттинг-коррозии состоит из трех основных периодов. На первой стадии наблюдается упрочнение поверхностей в точках контакта, разрушение пленок и их окисление. На второй стадии накапливается усталостная

повреждаемость подповерхностного слоя и происходит разрушение вновь образующихся пленок. Продуктами износа при фреттинг-коррозии металлов являются их окислы, удаление которых из зоны контакта затруднено из-за малой амплитуды колебаний. Они по удельному объему в 2 раза больше основного металла и их накопление сопровождается местным увеличением напряжений.

Третья стадия связана с окончательным разрушением зон повреждаемости, предварительно разрыхленных усталостным и коррозионными процессами. Здесь коррозионные процессы приходят на смену окислительным. Чем больше число циклов относительных перемещений в единицу времени и чем больше амплитуда этих перемещений и давление в точках контакта, тем интенсивней происходит процесс.

Обычная смазка не устраняет развитие фреттинг-коррозии. К технологическим методам борьбы с фреттинг-коррозией относятся упрочнение контактирующих поверхностей или нанесение неметаллических покрытий (полимерных, лаковых и клеевых пленок).

Водородное изнашивание – процесс разрушения поверхности детали в результате выделения ионов водорода из соединений и воды при трении деталей, попадания их в микротрещины деталей и соединения ионов в молекулы водорода.

При соединении ионов в молекулы происходит увеличение объема вещества. В результате этого в микротрещинах наблюдается отщепление частиц металла от детали. Этот вид износа проявляется при трении следующих металлов: стали по бронзе; резины по стали; пластмассовых тормозных колодок по чугуну; стального вала по постели баббитового подшипника. Для уменьшения водородного износа деталей необходимо применять смазочные материалы, исключающие образование в масле водородообразующих элементов, а также вещества, поглощающие водород; правильно подбирать материалы деталей в сопряжениях.

5.7 Структурная приспособляемость материалов при трении

Структурная приспособляемость – это явление изменения исходной структуры и свойств поверхностных слоев трущихся материалов в устойчивую для данных условий нагружения форму. При этом повышается износостойкость трущихся поверхностей.

Для всех материалов и сред существует определенный диапазон нагрузок и скоростей, обеспечивающий протекание нормального механохимического изнашивания. Доказательством существования диапазона нормального механохимического износа является зависимость величины износа от скорости скольжения. Также при нормальном износе количество кислорода в поверхностных слоях возрастает в 30–100 раз по сравнению с исходным. Кислород играет ключевую роль в повышении износостойкости. Так, минимальная интенсивность изнашивания у шарикоподшипников без смазки наблюдается при давлении воздуха от 13,3 до 133 Па. При большем давлении интенсивность изнашивания увеличивается, а при давлении менее 13,3 Па возникает схватывание. При замене воздуха азотом или аргоном во всем диапазоне скоростей наблюдается схватывание первого или второго рода; интенсивность износа в азоте больше, чем в воздухе в 5, а в аргоне – в 80 раз.

При нормальном механохимическом изнашивании:

- 1) отсутствуют любые виды макроскопической повреждаемости поверхностей трения (схватывание, пропахивание, внедрение, микрорезание);*
- 2) интенсивность износа и сила трения минимальны по сравнению с любым другим видом взаимодействия и разрушения поверхности;*
- 3) происходит оптимизация микрорельефа поверхности в области малых шероховатостей в соответствии с физико-механическими свойствами сопряженных материалов пары трения.*

Механизм структурной приспособляемости заключается в том, что в процессе приработки трущихся деталей происходит их физико-химическое взаимодействие с активными компонентами среды; в результате на поверхности возникают тонкие пленки вторичных структур. Рассмотрим процесс подробнее.

Трение приводит к упруго-пластической деформации и вызывает начальное изменение рельефа и структуры поверхности и образование тепла. При этом пластическая деформация происходит в тончайших поверхностных слоях; текстура поверхностного слоя измельчается и ориентируется относительно направления перемещения, что приводит к анизотропии фрикционных свойств (анизотропию можно обнаружить трибометром с неповреждающим индентором). Силы трения, измеренные в направлении текстуры и противоположном ей, отличаются в два раза. В поверхностном слое аккумулируется большое количество энергии; происходит структурная и термическая активация поверхности, которая приводит к ее взаимодействию с активными компонентами среды и мгновенной пассивации. Из-за этого образуются вторичные структуры. Они обладают высокой прочностью, сопоставимой с прочностью исходных материалов. Благодаря им замедляются физико-химические превращения и разрушение нижележащих слоев материала.

Вторичные структуры подразделяются на два типа:

Вторичные структуры первого типа *представляют собой твердые растворы компонентов среды в металле.* Они гладкие, плохо смачиваются маслом.

Вторичные структуры второго типа – *это химические соединения элементов среды (кислорода, водорода, азота и др.) с металлом.* Они шероховатые, хорошо смачиваются маслом.

Переход от одного типа к другому определяются условиями нагружения и удельной работой трения. Различное сочетание типов вторичных структур дает различные коэффициенты трения. Сочетание второго и второго типов вторичных структур дает наибольший коэффициент трения и используется во

фрикционных парах. Сочетание первого и второго типов вторичных структур дает наименьший коэффициент трения и используется в подшипниках скольжения и других трущихся парах, где важны антифрикционные свойства. Сочетание структур первого типа дает средний коэффициент трения и хорошую электропроводность, применяется в скользящих контактах.

Однако пленки вторичных структур в процессе работы сопряжения разрушаются и образуются вновь. Периодичность этого процесса (по экспериментальным данным, полученным в лабораторных условиях) составляет от одной до семи минут и изменяется в зависимости от скорости скольжения и давления. Также периодически изменяется и коэффициент трения (рис. 5.3).

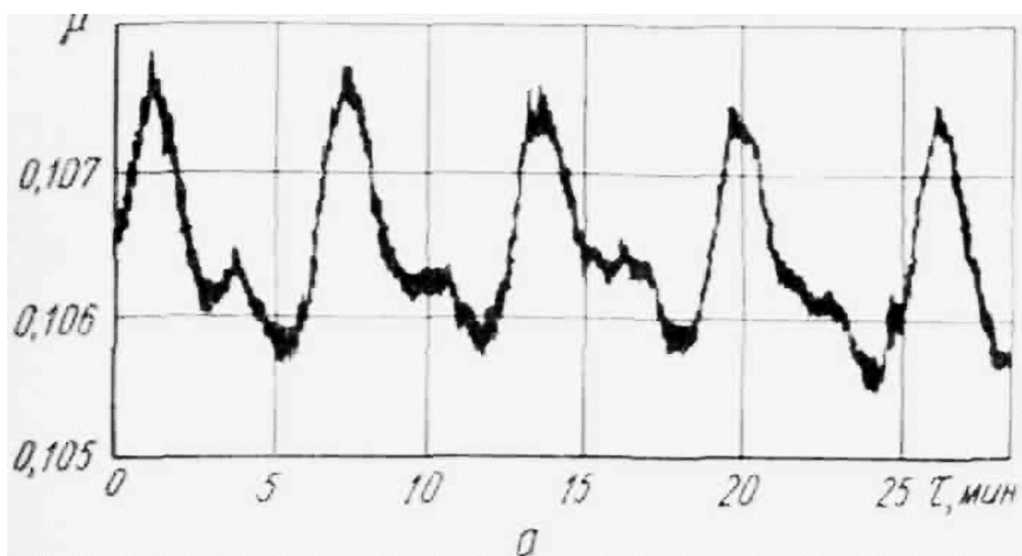


Рисунок 5.3 – Изменение коэффициента трения во времени при нормальном механохимическом изнашивании (сталь 45, $v = 1,1$ м/с; $P = 16$ МПа)

У полимеров структурная приспособляемость проявляется в переходе поверхностных слоев исходного материала из аморфного или кристаллического состояния крупного строения в ультрадисперсные пленки, обладающие защитными, противоизносными и антифрикционными свойствами.

5.8 Нормальные и патологические процессы трения

Сила трения – это суммарный показатель, характеризующий сложные механизмы взаимодействия поверхностей твердых тел: упруго-пластическую деформацию поверхностных слоев; физические, химические и другие процессы в зоне трения. Количественной оценкой взаимодействия поверхностей служит коэффициент трения. Но сила трения в большинстве случаев носит осциллирующий характер. Общепринятое обозначение силы трения в виде постоянной величины носит условный характер. Одной и той же нормальной нагрузке могут соответствовать различные значения сил трения в зависимости от скорости относительного перемещения, температуры и среды. Поэтому оценка по коэффициенту трения неприменима для различных условий трения. Неопределенность коэффициента трения показывает следующий эксперимент (рис. 5.4).

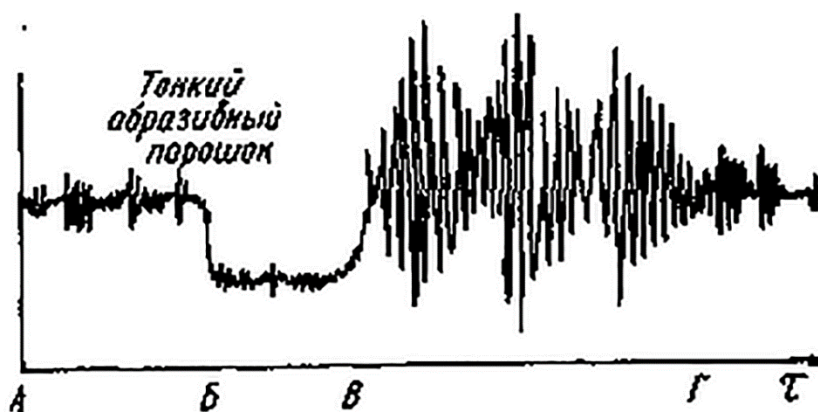


Рисунок 5.4 – Зависимость силы трения от времени (τ) при возникновении на контакте различных физико-химических процессов

Во время установившегося процесса трения и окислительного износа (участок АБ) при неизменных значениях нагрузки в зону контакта был подан абразивный порошок (точка Б). Это вызвало падение коэффициента трения и одновременно интенсивное разрушение защитных окисных пленок (БВ). Разрушение пленок привело к скачкообразному изменению силы трения (ВГ – участок схватывания I рода). В дальнейшем при прекращении подачи абразива

окисные пленки восстанавливались и наступал первоначальный установившийся режим трения, характерный для данного сочетания нагрузки.

В зависимости от шероховатости поверхности, наличия или отсутствия окислов и смазки коэффициент трения при неизменных значениях нагрузки может изменяться на два порядка. В зависимости от ведущего процесса при трении резко меняются не только значения силы трения, но и характер ее колебаний во времени. Таким образом, сила трения является функцией не только от нормальной нагрузки, но и от процессов, возникающих при сочетании нормальной нагрузки F , скорости скольжения v и вектора параметров трения $\vec{N}$ (материалов, условий среды и т. д.). При этом в зависимости от возникновения того или иного ведущего процесса сила трения изменяется скачкообразно, и только в пределах протекания одного ведущего процесса она имеет плавное изменение своего среднего значения.

В практике, несмотря на широкий диапазон условий эксплуатации машин, были выделены такие режимы, при которых силы трения невелики и достаточно стабильны. Рассмотрим характеристики процессов нормального трения и трения с повреждаемостью (патологического) (табл. 1).

Таблица 5.1 – Характеристики нормального и патологических процессов трения

Характеристика	Нормальное трение	Патологические процессы
Коэффициент трения	0,005–0,150	0,30–40
Износ (мкм на 1 000 м пути)	менее 0,01	100 и больше
Класс чистоты	10–14	1–3

В большинстве исследований зависимость коэффициента трения от нагрузки или от скорости скольжения содержит такой участок, на котором значения коэффициентов трения примерно постоянны и минимальны. Этот участок называется стационарным (рис. 5.5).

Стационарный участок всегда связан с определенным видом разрушения поверхностей трения. Этот вид износа определяется динамическим равновесием процессов разрушения и восстановления вторичных структур. В обычных условиях эксплуатации машин – это механохимический процесс окислительного износа. Главной особенностью нормального процесса является локализация пластической деформации в поверхностных слоях порядка 10–100 нм и ее однородность (рис. 5.6).

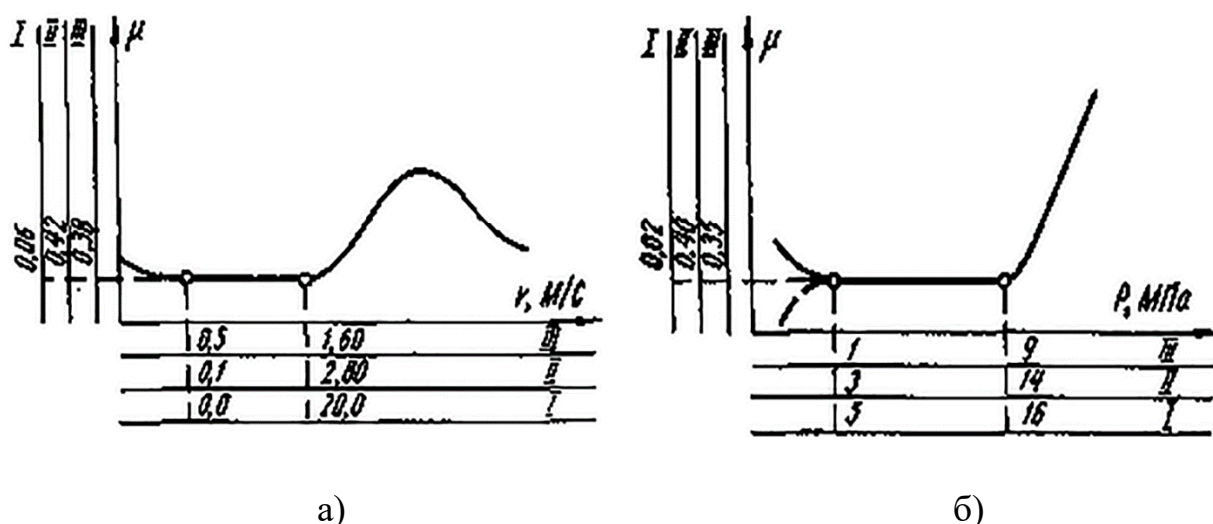
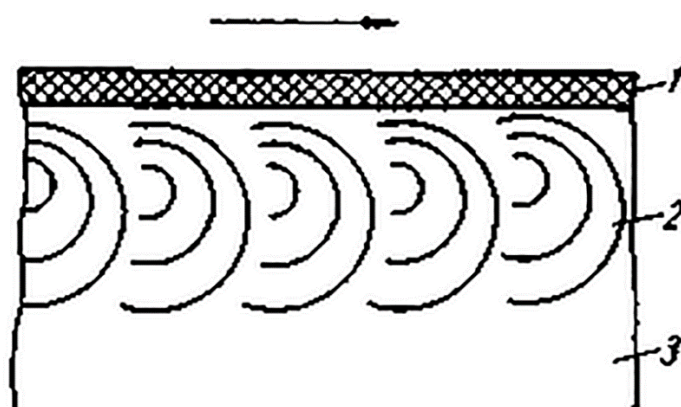


Рисунок 5.5 – Наличие стационарной области по скорости (а) и давлению (б) для различных параметров трения



1 – пленки вторичных структур; 2 – зона упругих деформаций; 3 – основной металл

Рисунок 5.6 – Схема строения поверхностных слоев при нормальном трении

Недопустимые процессы повреждаемости при трении связаны с явлениями схватывания I и II рода, возникающими при нарушении динамического равновесия образования и разрушения защитных окисных пленок. В процессе внешнего трения происходит трансформация внешней механической работы в энергию внутренних процессов. Установлено, что при внешнем трении изменяются свойства поверхностных слоев материалов.

Происходят структурные превращения, увеличивается сопротивление деформации и твердость, возрастает электрическое сопротивление, усиливаются диффузионные процессы и образуется теплота. Проявляются признаки объемной пластической деформации и разрушения, распространяющиеся на глубину порядка сотен микрометров (рис. 5.7).

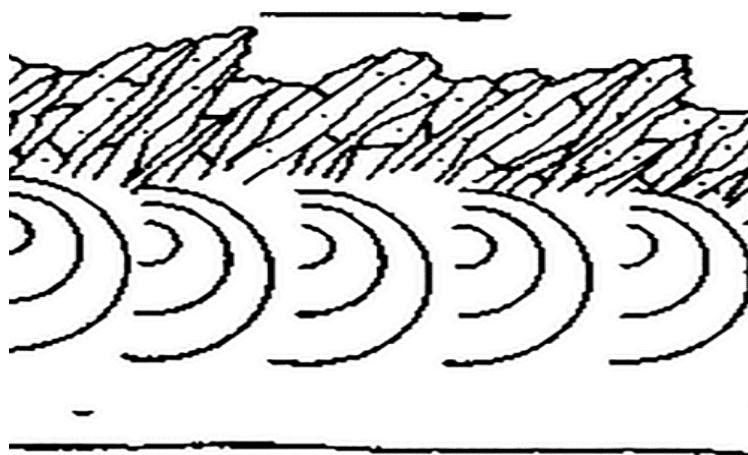


Рисунок 5.7 – Схема строения поверхности и поверхностных слоев при повреждаемости

В некоторых случаях на контакте возникают температуры, вызывающие фазовые превращения, отпуск и т. д. Процессы повреждаемости, как правило, ведут к потере поверхностной прочности, что недопустимо.

Контрольные вопросы

1. Какие причины приводят к потере машинами работоспособности?
2. Какие существуют теории трения?
3. Какие существуют виды трения?

4. Какие существуют способы смазки трущихся поверхностей?
5. Что такое износ и изнашивание?
6. Какие существуют виды изнашивания?
7. Что такое нормальные и патологические процессы трения?
8. В чем заключается явление структурной приспособляемости?
9. Что такое анизотропия?
10. Что из себя представляют вторичные структуры 1-го и 2-го типов?
11. В чем заключаются особенности физического механизма структурной приспособляемости?

ЛЕКЦИЯ 6.

ПОВРЕЖДЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ОТСУТСТВИИ ТРЕНИЯ

6.1 Виды повреждения деталей при отсутствии трения

Повреждение и разрушение деталей машин при отсутствии трения может быть следующих видов:

- 1) от нагрузок, вибраций, ударов (усталостные разрушения, пластические деформации, тепловые разрушения);
- 2) от внутренних напряжений (коробление, изгиб, скручивание);
- 3) от коррозии (химическая и электрохимические коррозии).

1. Усталостное разрушение. *Явление усталостного разрушения деталей связано с пластической деформацией, при которой происходят различные взаимодействия внутренних дефектов кристаллической решетки – дислокаций, скопление вакансий и зарождение усталостной трещины.* Многократное приложение нагрузок вызывает разрушение деталей при напряжениях значительно меньших, чем в случае однократного их нагружения. При большом числе повторных нагружений напряжения, при которых происходит разрушение, могут быть ниже предела прочности, предела текучести и даже предела упругости. Это явление было названо усталостью металлов.

Усталостью металла называется процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящих к образованию трещин и разрушению. К деталям, подверженным усталостному разрушению, относятся коленчатые валы, рессоры, шатуны, полуоси, валы рулевых сошек, элементы рам машин, пружины и др.

Внешним проявлением усталости металлов является возникновение характерных трещин на поверхности изделий в тех местах, где имеются концентраторы напряжений – следы обработки инструментом, переходы от одного

сечения к другому и т. д. Трещины усталости проявляются не сразу, а постепенно. Сначала в металле накапливаются необратимые изменения, приводящие к возникновению микроскопических трещин; затем происходит постепенное увеличение и углубление их внутрь изделия, пока это не приводит к хрупкому разрушению металла.

Возникновение трещин усталости связано с особенностями кристаллического строения металлов. В одних кристаллах под действием внешних сил возникает пластическая деформация, в других только упругая. Под действием знакопеременной нагрузки процесс пластической деформации в отдельных зернах (кристаллах) может быть исчерпан, что приводит к возникновению трещин.

Причинами, снижающими усталостную прочность деталей, являются несоблюдение радиусов перехода; наличие рисок, раковин, царапин, надрезов; грубая обработка поверхности; резкие температурные изменения.

Характерным признаком усталостного разрушения деталей является наличие на поверхности излома двух зон: зоны развития трещины с гладкой поверхностью и зоны поломки с шероховатой (кристаллической) поверхностью. При эксплуатации около 80 % поломок деталей происходит по причине усталостных изломов.

Для повышения усталостной прочности наиболее эффективным является создание напряжений сжатия на поверхности деталей, работающих в условиях циклически меняющихся нагрузок. Для создания напряжений сжатия применяют накатку роликом или шариком или дробеструйную обработку (рессоры). Наибольший эффект получают при наклепе в напряженном состоянии. Необходимо также тщательно обрабатывать поверхность шлифованием, полированием или притиркой. В целях увеличения усталостной прочности деталей переходы от одного сечения к другому выполняют по радиусу и шлифуют их.

2. Пластическое деформирование. Практически на всех машинах, находящихся в эксплуатации, многие детали пластически деформированы. *Пластическое деформирование проявляется в виде изгиба, скрученности, растяжения или смятия отдельных поверхностей. Происходит это под действием силовых нагрузок (как статических так и динамических), вызывающих напряжение в материале, превышающих предел текучести.* Так деформируются (коробятся) детали рам, облицовки кузовов, корпусные детали.

В корпусных деталях (блоки, корпуса коробок передач и задних мостов, головки цилиндров, корпуса редукторов и др.) при несении ими внешних силовых нагрузок в условиях вибрации и нагрева протекают процессы старения, и внутренние напряжения из-за этого перераспределяются. Практически все коленчатые и распределительные валы двигателей, особенно валы сельхозмашин и трансмиссий, в процессе использования изгибаются и скручиваются.

Также бывает местная пластическая деформация (например, смятие). При смятии в поверхностных слоях сопрягающихся деталей происходят пластические деформации и течение металла. Размеры деталей изменяются, но их масса сохраняется. В дальнейшем от деформированных участков поверхности могут отрываться отдельные частицы металла, что приводит к уменьшению массы и размеров деталей. Смятию больше всего подвержены детали резьбовых соединений, а также заклепки и заклепочные отверстия, шпонки со шпоночными пазами, шлицы, штифты, опорные поверхности двигателей и рам тракторов.

3. Коррозия. Многие детали сельскохозяйственной техники повреждаются во время эксплуатации и хранения машин под влиянием химических полей, которые могут действовать как самостоятельно, так и в их различных сочетаниях. Химические поля сильно изменяют физико-химические свойства металлов.

Химическая коррозия развивается в агрессивных средах и является прямым взаимодействием металла с элементами этих сред. Например, при взаимодействии стальных деталей с водой образуется ржавчина. Ржавчина является гигроскопичным веществом и хорошо поглощается влагу, что приводит к дальнейшему ржавлению стальных деталей. Также коррозионный износ преобладает при работе непрогретого двигателя, когда на стенках цилиндров конденсируются водяные пары, выделяющиеся при сгорании топлива. Водяные пары, соединяясь с сернистым газом или оксидом серы, которые в небольших количествах выделяются при сгорании топлива, образуют сероводородную и сернистую кислоты. Процесс коррозионного изнашивания цилиндров особенно заметен на двигателях с воздушным охлаждением на тех цилиндрах, которые ближе всего расположены к вентилятору. Также коррозия возникает в рубашке охлаждения, топливопроводах, тормозных гидроцилиндрах и т. д.

Применительно к деталям сельскохозяйственной техники химическая коррозия чаще проявляется в виде газовой коррозии. Она происходит при контакте с кислородом, сернистым газом, сероводородом, углекислым газом и водяными парами, главным образом, при повышенных температурах. При высоких температурах и давлении азот и водород тоже вызывает газовую коррозию с образованием нитридов и гидридов. Так, газовую коррозию можно наблюдать на днищах поршней, на распылителях форсунок и на других деталях в первые часы работы двигателя.

При взаимодействии стали с кислородом образуется тонкий слой оксида, который до определенной толщины (0,1 мкм) характеризуется цветом побежалости. Более толстые слои называются окалиной; они приобретают цвет, соответствующий новому химическому соединению. Окалина образуется на стенках выпускных коллекторов и трубах, на форсунках, поршнях и на других де-

талях после длительной работы двигателя, а также на колосниках топок котлоприготовительных машин и т. д. Окалина имеет кристаллическое строение; при этом ориентация ее решетки определяется ориентацией решетки металла.

Электрохимическая коррозия имеет место при наличии разности потенциалов на поверхности деталей. При этом разрушается металл, являющийся анодом. Атомы на его поверхности активно вступают в химическое взаимодействие с влагой и другими элементами среды, образуя окислы. Электрохимической коррозии подвержены детали электрооборудования, контакты, клеммы и т. д.

Также электрохимическая коррозия может возникать и без внешнего источника тока, например, при соприкосновении металла с токопроводящей жидкостью (электролитом). Она сопровождается переносом электронов с одного участка металла на другой и переходом металла в раствор. Это происходит из-за того, что зерна металла обычно служат анодами, а загрязнения и примеси – катодами. При наличии на поверхности детали электролита они образуют микроскопические гальванические пары, в которых анод растворяется и поэтому происходит разрушение металла. Также местные гальванические пары возникают в месте контакта двух разных металлов.

Такой электрохимической коррозии подвержены детали кузова, рамы, подвески, облицовки комбайнов, ящики сеялок и т. д.

Способы защиты от коррозии. Существуют следующие виды защиты металлов от коррозионного изнашивания:

1) *электрохимическая (протекторная) защита (анодная и катодная защита)*; например, стальную водопроводную трубу в земле соединяют проволокой с листом другого металла, который служит анодом и разрушается;

2) *применение консервационных материалов и ингибиторов* (НГ-203, НГ-204);

3) применение микровосковых составов, густеющих после покрытия (защитная водно-восковая дисперсия);

4) изоляция материала от прямого воздействия среды за счет применения разнообразных покрытий (как коррозионностойкими металлами (цинк, кадмий, хром, никель, олово медь,), так и неметаллами (полимерами, лакокрасочными материалами, фосфатами));

5) применение пассиваторов (создание защитной окисной пленки);

6) рациональный выбор материалов, стойких против коррозии.

Чтобы уменьшить коррозию черных металлов, их поверхность можно покрывать как менее стойкими к коррозии металлами (анодные покрытия), так и более стойкими (катодные покрытия). В зависимости от этого покрытия будут по-разному выполнять свою защитную функцию.

Анодные покрытия – это такая защита, при которой электродный потенциал покрытия оказывается более отрицательным по отношению к металлу защищаемой конструкции (например, $Zn - Fe$). При наличии царапин или пор в цинковом покрытии образуется гальваническая пара, в которой более отрицательным электрическим потенциалом обладает цинк, а менее активным металлом является железо.

Физическая сущность такой защиты заключается в следующем. Электроны более активного металла (цинка) перетекают на металл с меньшей активностью (железо) и удерживают его положительные катионы от перехода в электролит. В результате замедляется разрушение конструкции. Железо в этой паре не корродирует до тех пор, пока не будет разрушен слой цинка вокруг царапины. Таким образом, защита с помощью анодного покрытия сводится к жертве одного металла (более активного) для сохранения другого (менее активного). Такой метод снижения коррозии называют протекторной защитой. Впервые она была применена для предотвращения коррозии стальной обшивки морских судов. К корпусу судна прикрепляли цинковые пластины

(аноды), которые, растворяясь в морской воде, защищали стальной корпус, играющий роль катода.

Эффективность протекторной защиты зависит не только от материала протектора, но и от электропроводности электролита: чем выше его проводимость, тем на большую поверхность распространяется защитное действие протектора.

Катодные покрытия – это такая защита, при которой электродный потенциал покрытия оказывается более положительным по отношению к металлу защищаемой конструкции (например, $\text{Sn} - \text{Fe}$). При наличии царапины или трещины такое покрытие не только не защищает конструкцию от разрушения, но и, наоборот, ускоряет коррозию, так как в гальванической паре более активным металлом является железо, и коррозия распространяется под слой более благородного металла. Следовательно, при катодных покрытиях очень важно не допустить в них пор и трещин.

Применение консервационных материалов. Консервационные материалы (замедлители коррозии) образуют на металлической поверхности защитные пленки, которые изолируют металл от окружающей среды и разрушают систему гальванических микроэлементов на его поверхности.

Разработаны сотни различных консервационных материалов. Приведем перечень препаратов, выпускаемых на предприятиях России.

1. Пластичные смазки (пушечная смазка, смазки АМС и ЗЭС) характеризуются высокой защитной эффективностью, но значительной трудоемкостью как при консервации, так и при расконсервации.

2. Жидкие консервационные масла (НГ-203 и К-17) характеризуются хорошей технологичностью, но защитная способность их невысокая из-за возможности смыва атмосферными осадками. Их применяют для консервации внутренних поверхностей двигателей.

3. Пленкообразующие ингибированные нефтяные составы (НГ-216 и Ингибит-С) образуют на защищаемой поверхности твердые и полутвердые пленки. Эти составы применяют для противокоррозионной защиты техники на открытых площадках.

4. Защитные восковые дисперсии (ЗВД-13, ИВВС-706М и ПЭВ-74) представляют собой суспензии защитных материалов в воде (ЗВД-13, ИВВС-706М) или в бензине (ПЭВ-74). Такие составы обеспечивают защиту от атмосферной коррозии деталей машин не только из металла, но также из резины и лакокрасочных покрытий.

5. Маслорастворимые ингибиторы коррозии (МСДА-1, МСДА-2, Эмульгин и СЖК) в сочетании с маслами образуют консервационные композиции для защиты наружных и внутренних поверхностей машин и механизмов.

6. Летучие ингибиторы коррозии (Г-2, НДА и ХЦА), испаряясь в замкнутом объеме, насыщают своими парами поверхности изделий и предохраняют их от атмосферной коррозии.

7. Ингибированная бумага (МГБИ 3-40, МГБИ 3-25 и МГБИ 8-40) – это бумага, пропитанная нелетучими ингибиторами. Ее применяют для надежной герметизации изделий на срок от 5 до 10 лет.

4. Изнашивание при действии электрического тока. Электроэрозионное изнашивание – *эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока*. Некоторые детали электрооборудования машин, проводящие ток, периодически замыкаются и размыкаются, либо находятся на определенном расстоянии друг от друга. Между этими деталями возникает искровой разряд. Электроны ударяются в анод и расплавляют микрообъемы вещества на его поверхности. Расплавленные частицы анода уносятся с поверхности. Часть из них рассеивается в окружающей среде, а часть переносится на катод. Такому виду разрушения

подвержены электроды искровых свечей зажигания, контакты реле и прерывателя-распределителя, выключатели, щетки, коллекторные пластины и др.

5. Тепловое разрушение. *Происходит под действием теплового поля. Некоторые детали машин во время работы нагреваются, вследствие чего в них происходят процессы разрушения созданной ранее структуры материала, и они теряют свои служебные свойства.* Нагрев деталей может происходить из-за теплоты сгорания топлива, действия выхлопных газов. К таким деталям относятся головки цилиндров, поршни, выпускные коллекторы и трубы. Также нагрев происходит при трении (фрикционные пары, подшипники, шестерни), из-за теплового действия тока (детали электрооборудования, провода, обмотки, электронные компоненты), а также от внешних источников тепла (отопительные приборы, прямые солнечные лучи). Детали, претерпевшие тепловое разрушение, восстановлению не подлежат.

6. Отказы вибрационного происхождения. Надежность и долговечность машин, в значительной мере зависят от величины вибрации вращающихся деталей (карданных и коленчатых валов, маховиков, шкивов, дисков сцепления, колес и т. д.) вследствие их неуравновешенности. Во время ремонта при замене отдельных деталей нарушается балансировка вращающихся узлов. *Вибрация быстровращающихся деталей создает дополнительные нагрузки как на эти детали, так и на подшипники и на раму машины, из-за чего могут происходить поломки деталей.*

Неуравновешенность деталей может вызываться рядом причин:

- 1) неточностью в размерах деталей, особенно в размерах необрабатываемых поверхностей;
- 2) неравномерной плотностью материала;
- 3) погрешностями сборки, выражающимися в нарушении посадки вращающихся деталей на вал, перекосах, смещениях и т. д.

Установлено, например, что увеличение дисбаланса карданных валов вызывает резкое повышение износа торцов шипов крестовин и доннышек игольчатых подшипников, а также деталей шлицевого подвижного соединения. В результате ускоряется изнашивание деталей, коробки передач и заднего моста, сокращается долговечность рамы автомобиля. Поэтому при сборке особое внимание необходимо уделять проверке соосности соединения вращающихся деталей. От ее нарушения возрастает нагрузка на подшипники валов, наблюдается пробуксовка дисков муфт сцепления и муфт поворота, что приводит к снижению коэффициента полезного действия и повышению износа.

7. Другие виды повреждений деталей. Включают потерю приданных служебных свойств, образование накипи и нагар.

Потеря приданных служебных свойств. Такие детали, как роторы магнето, генераторов переменного тока и другие намагниченные детали теряют работоспособность из-за потери магнитных свойств под воздействием электрических и магнитных полей. Особенно сильно на их работоспособность воздействует встряска и вибрация. Также их работоспособность зависит от температуры, так как при нагреве выше точки Кюри ферромагнитные свойства исчезают. Магнитные свойства могут быть восстановлены повторным намагничиванием.

Упругие элементы, такие как листы рессор, пружины, торсионные валы, не изменяя своих размеров, теряют упругость и форму вследствие перераспределения внутренних напряжений под действием силового поля. Первоначальные свойства деталей могут быть восстановлены путем пластического деформирования или термической обработки.

Образование накипи. Иногда на поверхностях деталей откладывается накипь, что приводит к потере их работоспособности (заклинивание крыльчатки водяного насоса, закупоривание трубок радиаторов) и ухудшению теп-

лопроводности. Слой накипи представляет собой отложения слаборастворимых в воде солей и других примесей. Подобное наблюдается в системе охлаждения автотракторных двигателей.

Нагар образуется в результате отложения на поверхности деталей продуктов неполного сгорания ГСМ. Нагар (также как и накипь) нарушает нормальный процесс теплопередачи, что в большинстве случаев приводит к перегреву деталей, а иногда образованию трещин на их поверхности.

6.2 Способы определения износа деталей

Износы деталей машин определяют микрометражем, профилографированием, взвешиванием, выявлением количества стали в масле, радиоактивными изотопами, по отпечаткам и вырезанным лункам, по химическому или спектральному анализу смазки.

Профилографированием определяют изменение состояния поверхности и износа на определенных участках детали, имеющих малые износы (плунжеры, поршневые пальцы).

Для изучения износов при помощи **микрометража** машину или узел разбирают и детали замеряют при помощи измерительного инструмента в местах предположительного износа или деформации. Результаты фиксируются, затем происходит сборка и эксплуатация. После определенной наработки операцию повторяют. После многократного повторения таких циклов можно по данным микрометражного журнала построить кривую износа деталей и определить характер их износа. Микрометрирование является надежным способом определения ресурса деталей после определенных периодов работы. Однако для достоверности получаемых результатов потребовалось бы подвергать разборке большое количество узлов машины. При этом нарушалась бы первоначальная

начальная приработка сопряженных пар, что исказило бы действительное положение. Поэтому изучение износов деталей ведут у большой партии однотипных машин, работающих в одинаковых условиях. При этом соблюдают строгий учет ресурса деталей и узлов заменяемых до капитального ремонта агрегатов. Микрометрирование деталей после разборки агрегатов дает возможность получить данные для последующей обработки методами математической статистики с целью определения всех статистических характеристик износа: математического ожидания (среднего значения), дисперсии, эмпирических кривых распределения и соответствия их установленному закону.

Взвешивание не дает возможности выявить изношенные участки деталей, характер их износа.

Преимущество способа определения износа по количеству стали в масле заключается в том, что не требуется разборки агрегата; недостаток состоит в невозможности определить, какие конкретно детали изнашиваются.

6.3 Приработка деталей машин

Приработка – процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

Характеристики поверхности при технологической обработке и в процессе эксплуатации принципиально различны. Они отличаются не только шероховатостью, но и свойствами поверхностных слоев и напряженностью. В процессе работы сопряженных поверхностей происходит изменение их исходного состояния и переход к рабочему (эксплуатационному) состоянию.

Всего в работе деталей существуют три периода износа: 1) *начальный износ, когда происходит переход от исходного состояния поверхности к установившемуся*; 2) *установившийся, отличающийся постоянством условий трения и скорости износа*; 3) *усиленный, вызываемый изменением зазоров в соприжениях и изменениями условий работы узла*.

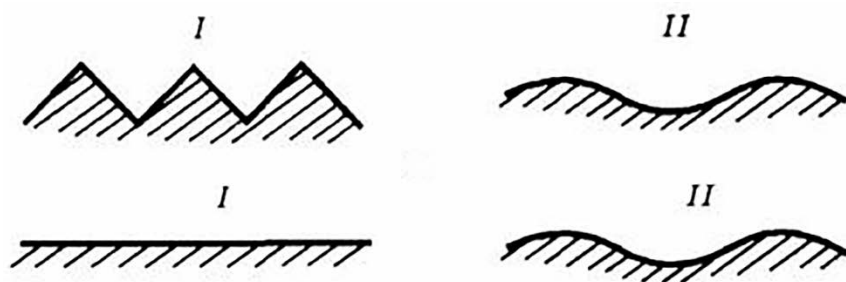
При начальном износе скорость износа все время изменяется, приближаясь к некоторой постоянной установившейся величине; условия трения также постепенно изменяются. Величина фактической площади контакта увеличивается, среднее удельное давление и температура уменьшаются. В начале приработки удельные давления имеют большую величину из-за малой площади контакта микровыступов поверхности. В конце приработки их величина соответствует допустимой для нормальной эксплуатации машин.

Для увеличения срока службы машин необходимо сократить величину начального износа до минимума и максимально увеличить продолжительность установившегося износа.

Поскольку при механическом истирании имеют место все виды деформаций (смятие, срез, изгиб), то для обеспечения износостойкости прочность и твердость материалов деталей должны быть такими, чтобы противостоять этим деформациям. С точки зрения рассмотренной ранее молекулярно-механической теории, износ – это результат как разрушения поверхностных слоев деталей, так и их молекулярного взаимодействия. При этом в процессе приработки гладкая поверхность может стать шероховатой, и наоборот (рис. 6.1).

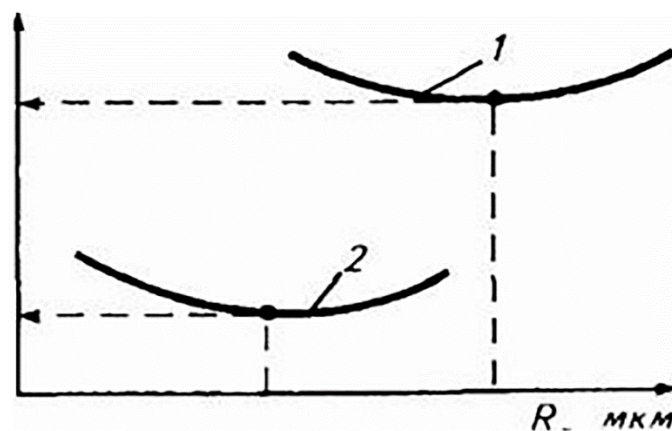
Профессором П. Е. Дьяченко установлено, что после приработки сопряженных деталей устанавливается оптимальная с точки зрения износостойкости шероховатость, не зависящая от первоначальной шероховатости, полученной при изготовлении детали. Она определяется лишь условиями изнашивания: режимом нагружения и скоростью относительного перемещения. Для од-

них соединений минимальный износ будет при одной шероховатости, для других – при другой. В обоих случаях, как увеличение шероховатости, так и ее уменьшение, приводят к ускорению износа. Из этого следует, что при изготовлении и восстановлении деталей необходимо выбирать такой способ окончательной механической обработки, при котором будет достигаться шероховатость, идентичная, получаемой при приработке (рис. 6.2).



I – до приработки; II – после приработки

Рисунок 6.1 – Схемы образования оптимальной шероховатости поверхностей в процессе приработки



1 – тяжелых; 2 – более легких

Рисунок 6.2 – Зависимость износа поверхностей трения от шероховатости при различных условиях работы

Например, оптимальная шероховатость для некоторых ответственных соединений деталей будет следующая:

- 1) для шатунных и коренных шеек коленчатых валов от $Rz\ 1,6$ до $Rz\ 0,4$;
- 2) для вкладышей должна быть на один класс грубее, чем для шеек;

3) для гильз цилиндров – от Rz 1,6 до Rz 0,8, а для поршневых колец – на один класс ниже.

Эффективный способ уменьшения изнашивания деталей, работающих при трении скольжения – создание условий для жидкостного трения. Для соединения типа «вал – подшипник» условие сохранения жидкостного трения выражают через среднюю высоту микронеровностей трущихся поверхностей:

$$h_{min} \geq 1,5(\delta_v + \delta_n) \quad (6.1)$$

где h_{min} – минимальная толщина слоя смазочного материала в самом узком месте клиновидной щели (измеряют по впадинам микронеровностей);

δ_v и δ_n – средняя высота микронеровностей вала и подшипников соответственно.

Основные условия для создания жидкостного трения:

1. Чем меньше частота вращения n и чем больше удельная нагрузка p на подшипник, тем больше должна быть вязкость масла η для сохранения необходимой толщины масляного слоя. Исходя из этого, для тихоходных и тяжело нагруженных механизмов следует применять более вязкие масла. Например, летние масла для дизелей имеют кинематическую вязкость при температуре 100 °С, равную 11–16 мм²/с (сантистокс), а для карбюраторных двигателей – 8–10 мм²/с.

2. Не допускать снижения частоты вращения вала. Перегрузка двигателя приводит к резкому уменьшению толщины масляного слоя, и происходит металлический контакт трущихся поверхностей с форсированным износом.

3. Необходимо подогревать масло и антифриз перед пуском двигателя. При пусках и остановках машин, когда коленчатый вал неподвижен, масло выжимается из зазора, происходит интенсивное изнашивание. Пуски особенно опасны при низкой температуре. Установлено, что один пуск автомобиля при температуре минус 30 °С эквивалентен по износу пробегу в 700 км при нормальном температурном режиме.

4. Если жидкостное трение как наиболее радикальное средство снижения изнашивания неосуществимо в каких-то соединениях (например, поршневой палец и бобышки поршня, шестерни трансмиссии и др.), то необходимо создать условия для граничного трения. Для обеспечения устойчивого граничного трения современные минеральные масла выпускают со специальными присадками.

Однако, условия приработки автотракторных двигателей на заводах резко отличаются от эксплуатационных. Для обкатки двигателей предусмотрено три стадии. Первая стадия – холодная обкатка, когда коленчатый вал двигателя принудительно приводится во вращение от электродвигателя; вторая – горячая обкатка работающего двигателя без нагрузки; третья – горячая обкатка под нагрузкой. Завершают обкатку двигателей снятием контрольной величины развиваемой им мощности на тормозном стенде.

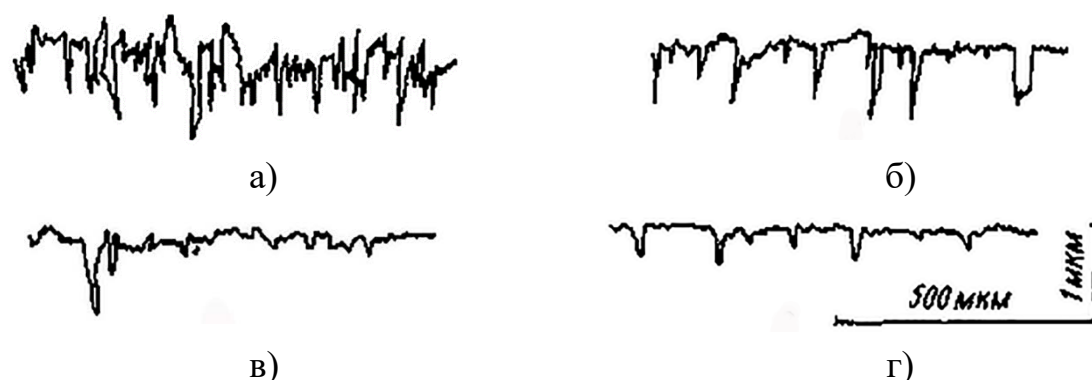
Большинство отечественных автомобильных заводов проводит приработку двигателей по двум стадиям без нагрузки. При этом время приработки двигателей на разных заводах неодинаково. Применяемые режимы изменения скорости вращения коленчатого вала и нагрузок различны даже для двигателей одной марки.

На зарубежных автозаводах режимы приработки также отличаются числом этапов, скоростью вращения коленчатого вала и нагрузками. Например, фирмы «Икарус» (Венгрия), «Шкода» (Чехия) и «ДжМС» (США) не производят холодной обкатки. Фирма «Татра» и «Шкода» не применяют обкатки на холостом ходу, заменяя ее кратковременным прогревом двигателя. Приработка под нагрузкой является основным видом и производится всеми заводами, но везде по-разному, и величины нагрузок колеблются в больших пределах. Например, «Татра» сразу после холодной приработки дает нагрузку до 50 %; завод им. К. Готвальда (Чехия) – 0,5 %; «Шкода» – 4,5 %.

Завершается приработка также при различных значениях нагрузки: в пределах от 81 до 90 % эффективной мощности. Интервалы между числами оборотов и соответствующими нагрузками не обоснованы и их выбор случаен. Продолжительность приработки тоже различна. Различны и требования к эксплуатационной приработке. Например, для Hyundai Accent обкаточный режим установлен в 2 000 км при скоростном ограничении в 88 км/ч. Для Mitsubishi Lancer нулевое ТО предусмотрено после 3 000 км; Toyota Corolla – через 1 000 км. Для Ford Focus, Ford Fusion, Chevrolet Lacetti и Renault Logan «нулевого» ТО не предусмотрено вообще.

Управление процессом приработки. Можно выделить два процесса, оказывающих решающее влияние на состояние рабочих поверхностей деталей. *Первый – технологический, связанный со снятием припусков при обработке.* Обработка металлов резанием происходит с максимальными удельными давлениями при высоких температурах и характеризуется большой концентрацией напряжений. Рабочие среды при резании выполняют функции охлаждения, уменьшения трения, удаления стружки. Все это оказывает большое влияние на формирование обработанных поверхностей и исходные (технологические) параметры их качества.

Второй процесс связан с условиями трения деталей. Здесь необходимо устранить разрушение поверхностных слоев и достигнуть высокой износостойкости. Давление и температура при этом не превышают допустимых значений, рабочие напряжения имеют плавный характер. Рабочие среды здесь обеспечивают минимальное трение и защиту поверхностей от разрушения. И одной из основных их функций является взаимодействие с поверхностными слоями, приводящее к созданию вторичных защитных структур, предохраняющих основной металл от разрушения (рис. 6.3).



а) до приработки; б) после двухчасовой приработки с применением масла ДС-11;
в) с добавкой олеиновой кислоты; г) с добавкой сульфосалициловой кислоты

Рисунок 6.3 – Профилограммы поверхности гильзы цилиндра

Поверхности деталей испытывают большие изменения как при технологической обработке, так и при эксплуатации. Но при технологической обработке процесс трансформации происходит в микроскопических объемах поверхностных слоев и имеет преимущественно механический характер. При эксплуатации трансформация происходит в субмикроскопических объемах и имеет механо-химический характер.

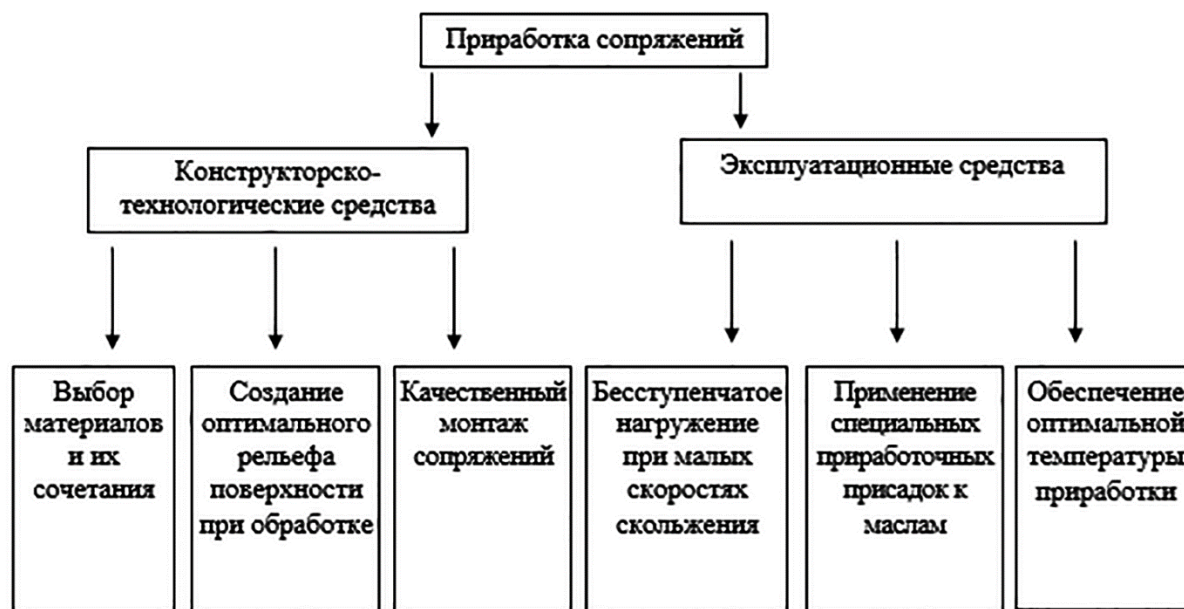


Рисунок 6.4 – Пути и средства управления приработкой

При приработке необходимо учитывать закономерности трансформации трущихся поверхностей в зависимости от режимов нагружения (P , v) и рабочих сред, а также устанавливать параметры приработки сопряжений в связи с конкретными конструкциями, условиями изготовления и сборки (рис. 6.4).

Контрольные вопросы

1. Что такое усталостное разрушение?
2. Какова сущность пластического деформирования?
3. Какие детали машин подвержены тепловому разрушению?
4. Почему вибрация приводит к выходу из строя механизмов?
5. Какова сущность коррозионного разрушения деталей?
6. Какие существуют пути снижения интенсивности изнашивания?

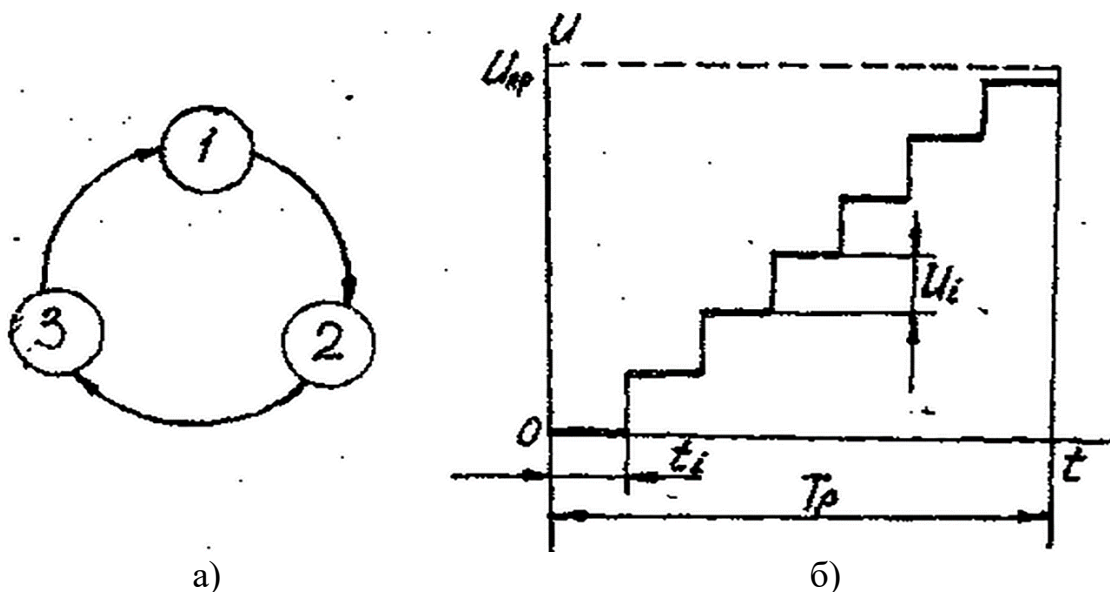
ЛЕКЦИЯ 7.

ПРЕДЕЛЬНОЕ И ДОПУСТИМОЕ СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ И СОЕДИНЕНИЙ

7.1 Изнашивание как случайный процесс

Износ металлов зависит от многих факторов и включает различные процессы, протекающие на макро- и микроуровнях, которые трудно разграничить. Поэтому для количественного описания процессов изнашивания при трении наиболее приемлема теория вероятностей и математическая статистика.

Природа изнашивания имеет тройственный механо-физико-химический характер. Схематически процесс механо-физико-химического изнашивания показан на рисунке 7.1, а.



а) процесс образования и разрушения вторичных структур; б) динамика изнашивания
 $U_{кр}$ – предельный износ детали; t_i – время работы детали от момента возникновения
в ее поверхностном слое упруго-пластической деформации до разрушения пленки
вторичных структур; $U_{и}$ – толщина разрушенной пленки вторичных структур
(приращение износа детали в результате единичного акта разрушения пленки);
 T_p – время работы детали до предельного износа

Рисунок 7.1 – Модель механо-физико-химического изнашивания

Его сущность заключается в протекании трех процессов: 1) механического процесса деформации тонких поверхностных слоев; 2) изменении их физико-механических свойств; 3) процесса химического взаимодействия деформированных слоев с активными элементами среды, приводящего к образованию на поверхности детали вторичных структур.

Таким образом, **механо-физико-химическое изнашивание** – это комплекс явлений, связанный с образованием и разрушением вторичных структур в поверхностных слоях деталей при нагружении их трением.

По оси абсцисс отложено время t работы детали, по оси ординат – величина накопленного износа I (рис. 7.1, б). Если деталь накопит определенное количество разрушений пленки вторичных структур она достигнет предельного износа. Это количество может быть подсчитано из уравнения (7.1):

$$m = \frac{I_{\text{пр}}}{M_{\text{иi}}} \quad (7.1)$$

где $I_{\text{пр}}$ – предельный износ;

$M_{\text{иi}}$ – среднеарифметическое значение толщины пленки вторичных структур.

Процесс механо-физио-химического изнашивания деталей является случайным, поэтому и наработка T_r детали до предельного износа будет случайной величиной. Это связано с тем, что пленки вторичных структур разрушаются, когда усилия, возникающие при трении, превосходят прочность этих пленок. При этом «пиковые» нагрузки возникают случайным образом и момент их появления невозможно предвидеть.

7.2 Предельные и допустимые значения износов

Установление предельно допустимых значений износов является сложной задачей, так как к деталям любой машины предъявляются различные требования. **Предельным износом ($I_{\text{пр}}$)** или **зазором ($S_{\text{пр}}$)** называется такой,

при котором наступает предельное состояние детали или сопряжения, и дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена во избежание аварийной поломки или резкого ухудшения характеристик изделия. Нарботка от начала эксплуатации до предельного состояния называется **полным ресурсом детали ($T_{\text{дп}}$)** или **полным ресурсом сопряжения**.

В хозяйствах при эксплуатации машин предельные зазоры служат ориентирами для выбраковки деталей. При ремонте на специализированных предприятиях предельное состояние принимают не по предельным значениям износов, а по допустимым ремонтным значениям износа или зазора, которые рассчитаны так, чтобы соответствующий им остаточный ресурс детали (сопряжения) был равен межремонтному ресурсу данного узла. Если измеренный износ или зазор меньше допустимых, эту деталь направляют в комплектацию как годную для установки на машину. В противном случае, детали бракуют или отправляют на восстановление.

Таким образом, *допустимые при ремонте износы и зазоры используют как выбраковочные показатели на ремонтных предприятиях, когда наряду с восстановлением работоспособности машины восстанавливают и ее межремонтный ресурс, заданный в технической документации.*

Предельно допустимый износ деталей, удовлетворяющий требованиям безопасной эксплуатации машин, выбирается с таким расчетом, чтобы его превышение не приводило сразу к аварии, то есть предусматривается определенный запас прочности в зависимости от ответственности деталей. При этом независимо от запаса прочности эксплуатация деталей с износом, превышающим установленные предельно допустимые значения, должна быть исключена.

При занижении значений предельных износов ресурс деталей используется не полностью, а при завышении этих значений возрастают аварийные ремонты. Установление неправильных значений допустимых и предельных износов, а следовательно, и ресурсов, вызывает увеличение простоев машин и

затрат на их ремонт. В некоторых случаях это может приводить к нежелательным последствиям (например, износ рабочих органов сельскохозяйственных машин приводит к ухудшению качества обработки, увеличению затрат мощности, расхода эксплуатационных материалов на единицу производимой работы и к более быстрому изнашиванию механизмов).

7.3 Критерии обоснования предельного состояния деталей машин

Критерий предельного состояния – признак или совокупность признаков, установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

Технический критерий устанавливается с учетом прочности деталей, величины нагрузок, условий трения и смазки, тепловой напряженности, интенсивности изнашивания и свойств поверхностных слоев. Его устанавливают, исходя из требований к безотказности, работе без поломок.

Технологический или качественный критерий используют для оценки качества работы машины или агрегата. Предельные величины в этом случае устанавливают в зависимости от агротехнических требований и требований безопасности.

Экономический критерий оценивает снижение производительности машины, повышение расхода топлива, смазочных материалов и себестоимости выполнения работ. Его удобно применять при оценке экономической целесообразности дальнейшего использования машины по назначению.

Критерий предельного износа рекомендуется устанавливать в зависимости от того, какое влияние оказывает износ детали на работу машины. Необходимо отметить, что, хотя каждый критерий приемлем для установления предельного износа, основным критерием может быть только один. Остальные или не используются, или имеют вспомогательное или контрольное значение.

Для передаточных механизмов основным критерием является технический (критерий форсированного износа); для механизмов, управляющих процессами подачи топлива, его сгоранием, а также отводом выхлопных газов – экономический (производительность машины, затраты эксплуатационных материалов). Технологический критерий применяется для тех деталей, от которых зависит качество обрабатываемой поверхности или продукта (например, режущие грани инструмента, механизмы металлорежущих станков и т. д.).

Установление предельного состояния отдельного узла зависит от ресурса основных его деталей или устанавливается по наименее долговечной детали в узле. Например, в современных автотракторных двигателях такими деталями являются детали цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Следовательно, остается только правильно определить ресурс этих деталей. Также предельным состоянием двигателя считается, когда в предельном состоянии находятся блок цилиндров (требуется его замена или восстановление с полной разборкой двигателя). При этом показатели расхода масла на угар или прорыва газов в картер больше или равны предельному значению и не устраняются заменой поршневых колец.

Предельное состояние машины определяют по предельному состоянию ее составных частей. Например, колесный трактор с шарнирной рамой и гидромеханической коробкой передач считается в предельном состоянии, если в предельном состоянии находятся его основные агрегаты: двигатель, коробка передач, передний и задний мосты с колесными редукторами; а также дополнительные составные части: система управления поворотом, гидросистема, рама, кабина в сборе, раздаточная коробка.

За предельное состояние сварной рамы или полурамы трактора принимают такое состояние, при котором длина трещины лонжеронов или поперечных брусьев превышает 40 % периметра сечения.

Предельный износ или зазор часто определяют по кривой изнашивания, показанной на рисунке 7.2.

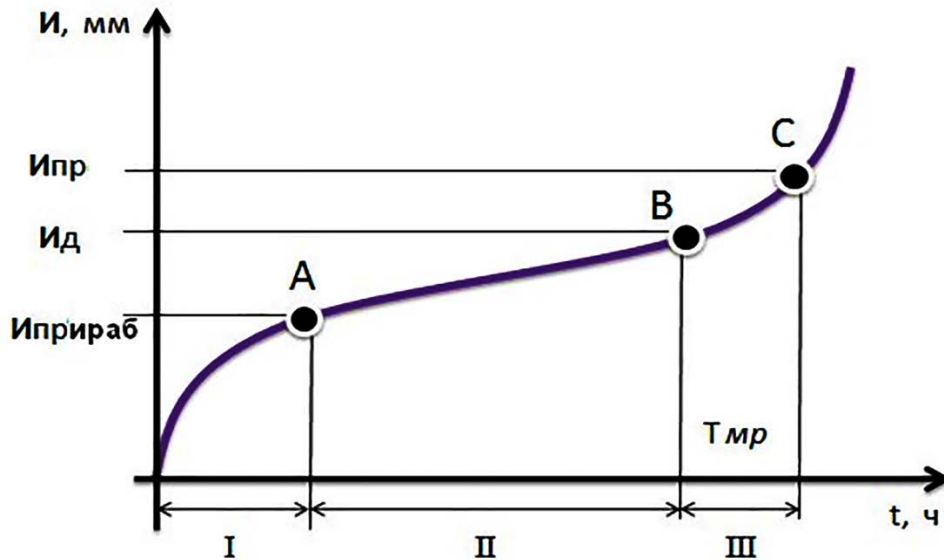


Рисунок 7.2 – Определение предельного и допустимого износов

Кроме этого, при назначении предельного износа рассматриваются обычно три случая:

1. В результате износа машина не может функционировать (рис. 7.3, а), то есть становится неработоспособной. Например, происходит поломка коленчатого вала, поломка поршневого кольца, заедание зубьев шестерен, задиры поверхностей вкладышей шатунных или коренных подшипников.

2. Износ приводит к форсированному изнашиванию поверхностей и интенсивному выходу деталей из строя (рис. 7.3, б). При этом повышается температура узлов, возрастает вибрация и возникают удары. Например, у хромированного поршневого кольца предельный износ наступит, когда слой хрома будет стерт, а у коленчатого вала – когда будет выработан верхний закаленный слой шеек и обнажится внутренний неупрочненный металл.

3. В результате износа характеристики машины выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (рис. 7.3, в). Например, когда металлорежущий станок перестает обеспечивать требуемую точность. Или двигатель авто-

мобиль не развивает требуемую мощность, имеет повышенный расход топлива и токсичность выхлопных газов. При этом техника продолжает работать, но качество ее работы перестает удовлетворять.

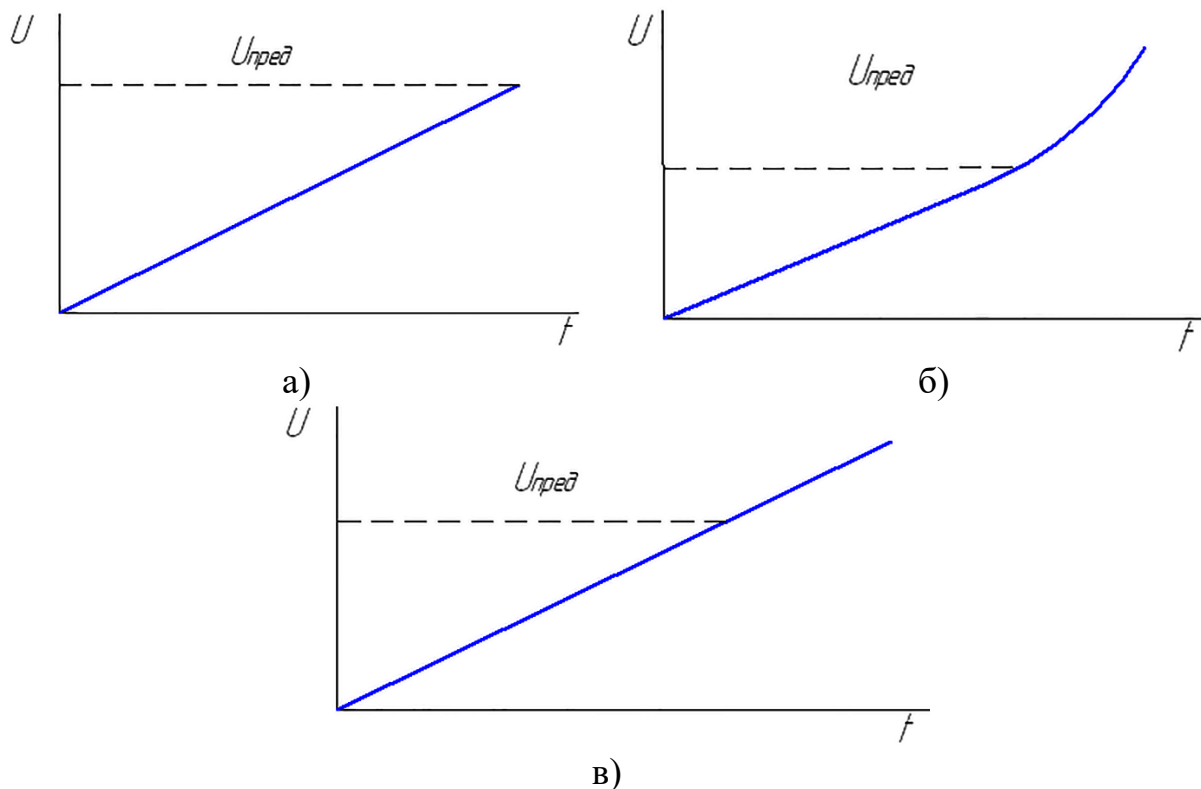


Рисунок 7.3 – Критерии предельного износа машины и ее элементов

Согласно требованиям ГОСТ 30479–97 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования», в зависимости от вида и функционального назначения изделия за **критерии предельного износа принимают:**

- 1) *начало резкого возрастания интенсивности изнашивания элементов машин, связанных с безопасностью;*
- 2) *самовыключение или самовключение изделия (например, из-за износа торцевой поверхности зубчатых колес коробок передач);*

3) предельно допустимое снижение прочности изнашиваемой детали (например, износ и обрыв проволок канатов грузоподъемных устройств из-за изнашивания толщины зуба у основания зубчатого устройства);

4) выходящее за пределы допустимого влияния износа отдельных деталей сопряжения на параметр безопасности изделия;

5) износ элементов зубчатых, цепных и других передач, крепежных элементов, вызывающих шум и вибрацию на месте оператора;

6) возникновение триботехнических отказов, связанное с уменьшением силы трения до уровня ниже допустимого; заедание, заклинивание механизмов (например, износ по толщине накладок фрикционных тормозов и муфт, приводящий к уменьшению силы трения, а, следовательно, и силы удерживания грузов или машины на уклонах и т. д.);

7) нарушение кинематического взаимодействия деталей (например, чрезмерное увеличение динамических нагрузок на элемент или группу элементов вследствие износа подшипников и перекоса валов);

8) изменение или невозможность выполнения изделием заданных функций, приводящее к нарушению безопасности (например, схождение цепи со звездочки вследствие износа шарниров; вытяжка, снижение качества очистки поверхностей труб вследствие износа щеток очистной машины).

Вопрос установления предельно допустимых износов, сверх которых сопряжение не должно допускаться к работе без ремонта, сводится к установлению либо предельного роста зазоров от номинальных до максимально допустимых; либо установлению предельно допустимого искажения геометрической формы детали (овальность, конусность и т. д.).

7.4 Теоретическое обоснование

предельных изменений посадок в сопряжениях

Любое сопряжение деталей характеризуется посадкой. Посадка указывает на свободу относительного перемещения деталей или прочность их неподвижного соединения. Так как выбор посадки производится из условий надежной работы сопряжения, то при наличии зазора имеется ввиду, что он будет увеличен при изнашивании до определенного предела, за которым нарушается характер работы механизма.

Для уменьшения трения и изнашивания сопряженные поверхности обычно разделяют смазочным материалом. Согласно гидродинамической теории смазки, расход жидкости в сопряжении выражается зависимостью (7.2):

$$q = bs \frac{v}{2} - \frac{bs^3}{12\eta} - \frac{dk}{dx} \quad (7.2)$$

где q – расход жидкости;

b – ширина канала;

s – высота канала (зазор);

v – скорость перемещения одной плоскости относительно другой;

η – абсолютная вязкость масла;

$\frac{dk}{dx}$ – изменение давления в направлении потока (знак «минус» указывает, что направление движения поверхностей противоположно направлению давления).

Из уравнения (7.2) видно, что с ростом зазора утечка жидкости резко возрастает. Следовательно, может оказаться, что при определенном зазоре масло под рабочим давлением будет полностью выжато и нормальная работа сопряжения нарушится. В этом случае зазор будет считаться предельным.

Определение предельного состояния. При определении предельного состояния сопряжений типа «вал – подшипник», работающих в условиях жидкостного трения, за основу принимается гидродинамическая теория смазки.

На основании этой теории, Гюмбелем предложена зависимость для определения удельной нагрузки на подшипник (7.3):

$$k = \frac{\eta\omega}{\psi^2} f \quad (7.3)$$

где k – удельная нагрузка на подшипник;

ω – угловая скорость ($\pi n/30$);

ψ – относительный зазор (отношение абсолютного зазора к диаметру вала);

$f = \frac{1,04}{1-\lambda}$ – эмпирическое уравнение, которое справедливо для значений λ в пределах от 0,5 до 0,95;

λ – относительный эксцентриситет (отношение абсолютного эксцентриситета к половине зазора).

Эмпирическое уравнение $f = \frac{1,04}{1-\lambda}$ справедливо, если:

- 1) вал и подшипник имеют бесконечно большую длину;
- 2) поверхности вала и подшипника идеально гладкие;
- 3) вал и подшипник имеют идеально правильные цилиндрические формы.

Для учета конечной длины подшипника, Гюмбель ввел поправочный коэффициент:

$$c = \frac{d + l}{l} \quad (7.4)$$

где d – диаметр вала;

l – длина подшипника.

Подставив в зависимость (7.3) значения f , ω и c , получим выражение (7.5):

$$k = \frac{\pi n \eta d^2 1,04}{30 s^2 c (1 - \lambda)} \quad (7.5)$$

Толщина слоя смазки в самом узком месте клиновой щели определяется по формуле (7.6):

$$h_{min} = \frac{\eta n d^2}{18,36 k s c} \quad (7.6)$$

где n – частота вращения вала;

s – зазор.

Гюмбелем установлено, что наименьшее трение наблюдается, когда λ равно 0,5, то есть когда $h_{min} = s/4$. При этом зазор наиболее выгоднейший, он получается после приработки нового сопряжения. Величина наиболее выгоднейшего зазора определится из выражения (7.7):

$$s_{выг} = 0,467d \sqrt{\frac{\eta n}{kc}} \quad (7.7)$$

Снижение относительного эксцентриситета λ ниже 0,5 вызывает резкое увеличение трения в подшипнике. Предельно допустимый зазор возникнет тогда, когда поверхности вала и подшипника начнут касаться друг друга и произойдет нарушение жидкостного трения. Это случится при условии (7.8):

$$h_{min} = \delta_v + \delta_{\Pi} = \delta' \quad (7.8)$$

где δ_v и δ_{Π} – неровности приработанных поверхностей вала и подшипника соответственно.

Отсюда найдем максимально допустимый зазор:

$$s_{max} = \frac{s_{выг}^2}{4\delta'} \text{ или } s_{max} = 13,6 \frac{\eta n d^2}{ck} \quad (7.9)$$

Наименьший допустимый зазор определяется по формуле (7.10):

$$s_{min} = 0,3d \sqrt{\frac{\eta n}{kc}} \quad (7.10)$$

В ряде сопряжений чрезмерный рост зазоров может вызвать ударные нагрузки (например, в сопряжении «поршневой палец – втулка шатуна»). Для таких сопряжений максимально допустимый зазор составит:

$$s_{max} = 21,5l \sqrt{\frac{\eta}{kt}} \quad (7.11)$$

где l – длина опорной части втулки, мм;

k – среднее удельное давление в тактах сжатия и расширения;

t – время, в течение которого действует удельное давление.

Сила удара изменяется пропорционально кубическому корню из величины зазора четвертой степени (7.12):

$$T = a^3 \sqrt{s^4} \quad (7.12)$$

где a – постоянная величина ($a = \frac{1,78mn^2}{\sqrt[3]{R^4}} = const$).

Данная зависимость показывает, что *сила удара интенсивно растет при увеличении зазора.*

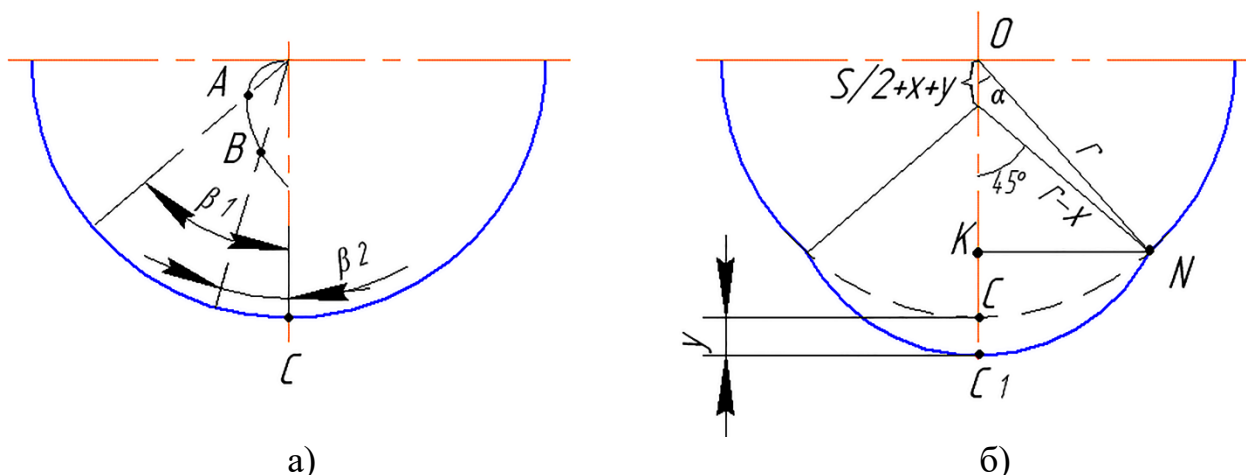
7.5 Определение предельного состояния геометрической формы деталей

Работа сил трения и ударные нагрузки влияют не только на посадки, но и на форму деталей. Новая и изношенная деталь не имеют геометрического подобия. Поэтому необходимо установить предел искажения формы, переходить который недопустимо. *Под этим пределом понимают такое нарушение геометрической формы детали, за которым происходит значительное снижение качества работы механизма или за которым следует форсированный износ.*

Рассмотрим определение предельного состояния формы деталей на примере подшипника скольжения. Согласно теории смазки, вал, вращающийся в подшипнике, описывает своим центром кривую, близкую к полуокружности радиусом равным 1/4 зазора (рис. 7.4, а). Точка A отвечает положению центра вала при начальном зазоре ($S_{нач}$), а точка B при максимальном зазоре (S_{max}).

При начале работы сопряжения с начальным зазором вал проворачивается на угол β_1 , прежде чем достигнет устойчивого положения. Прохождение этого угла связано с определенным изнашиванием и вала, и подшипника, по-

сколько при пониженных оборотах можно рассчитывать лишь на полужидкостное трение. С ростом зазора этот угол будет уменьшаться, и при предельно допустимом зазоре (S_{max}) он будет равен β_2 .



- а) схематическое изменение положения центра вала при увеличении зазора от $S_{нач}$ до S_{max} ;
б) положение вала при предельном искажении геометрической формы подшипника
 r – начальный радиус вала; x – величина износа вала по радиусу

Рисунок 7.4 – Изменение формы вала и подшипника

Однако, если вал, благодаря его вращению можно считать равномерно изнашивающимся, то есть форма его сечения не искажается, то с неподвижным подшипником ситуация обстоит иначе. При постоянной нагрузке износ будет сосредоточен лишь в области угла β , причем и на этом участке он будет неравномерным, а увеличивающимся в точке C . Таким образом, точка C по мере изнашивания будет смещаться вниз. Если допустить, что вал не изнашивается, то наступит время, когда он образует в подшипнике лунку того же радиуса как и у него самого. Это и будет предел, так как при нем будет отсутствовать клиновидная щель по нагруженной части подшипника и вала, а, следовательно, не будет условий для жидкостного трения.

Согласно исследованиям, область давления у цилиндрических подшипников составляет 90–120 град. (рис. 7.4, б). Величина, на которую смещается вниз точка C , определяется по формуле (7.13):

$$y = \frac{0,5S_{\text{нач}}}{2,5 - \varepsilon} \quad (7.13)$$

где $S_{\text{нач}}$ – начальный зазор в сопряжении;

ε – опытная величина, показывающая какая деталь быстрее изнашивается (при $\varepsilon = 1$ износостойкость вала и подшипника одинаковые; при $\varepsilon = 0,5$ вал изнашивается в 2 раза быстрее подшипника; при $\varepsilon = 2$ подшипник изнашивается в 2 раза быстрее вала).

При новом сопряжении, когда износ вала $x = 0$ или $\varepsilon = 0$, уравнение (7.13) примет следующий вид:

$$y = 0,2S_{\text{нач}} \quad (7.14)$$

Величина y в уравнениях должна иметь конечное положительное значение. Отсюда предельное искажение геометрической формы детали, при котором нарушается режим жидкостного трения, достигается при $\varepsilon < 2,5$. Следовательно, чем выше износостойкость вала по сравнению с износостойкостью подшипника, тем менее чувствительным становится рассматриваемое сопряжение к оваллизации шеек.

Если оваллизация шейки достигает величины, равной разности между максимальным и начальным зазором в сопряжении, то дальнейшее использование такого сопряжения недопустимо. По меньшей оси овала зазор будет предельно максимальный. Устранить зазор подтягиванием подшипника при этом нельзя, так как после поворота на 90 градусов вал заклинится (большая ось овальной шейки совпадает с меньшей осью подтянутого подшипника):

$$S_{\text{max}} = \frac{S_{\text{нач}}^2}{4\delta'} \quad (7.15)$$

где δ' – неровности поверхностей приработанного сопряжения.

Используя коэффициент ε , можно найти максимально допустимую овалзацию вала по формуле (7.16) и максимально допустимую овалзацию втулки подшипника по формуле (7.17):

$$x = \frac{(S_{max} - S_{нач})}{1 + \varepsilon}, \quad (7.16)$$

$$y = \frac{\varepsilon(S_{max} - S_{нач})}{1 + \varepsilon} \quad (7.17)$$

График изнашивания сопряжения покажем на рисунке 7.5.

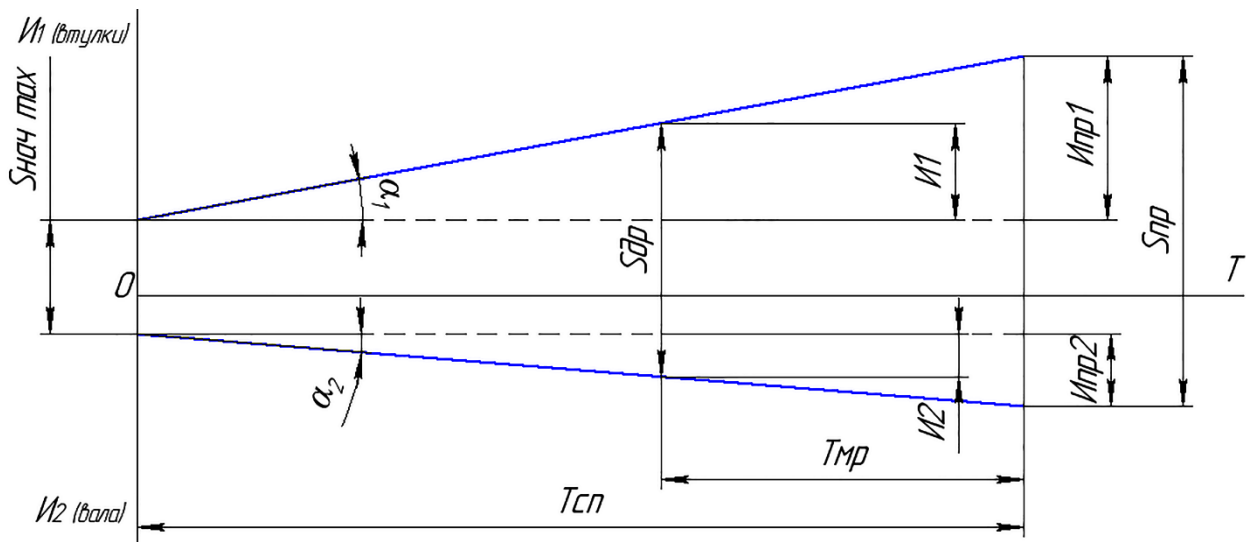


Рисунок 7.5 – Расчетная схема изнашивания деталей соединения

По горизонтальной оси откладывается наработка, по вертикальной – величина зазора. За ноль принимается номинальный размер детали без допусков.

Например, если втулка имеет размер по чертежу $18^{+0,060}_{+0,030}$ мм, а вал соответственно $18_{-0,012}$ мм, то значение 18 принимается за начальную точку по вертикальной оси, от которой откладываются максимальные величины допусков на обе детали. Расстояние между этими допусками по оси Y является начальным зазором в сопряжении.

По мере изнашивания сопряжения диаметр вала уменьшается, а втулки увеличивается. Скорость изнашивания в период нормальной работы узла примерно постоянна, и изменение зазора происходит по линейному закону. Отсюда следует, что скорость изнашивания детали на графике равна тангенсу угла α . Предельный зазор (износ) соответствует величине наработки, которая равна полному ресурсу (T_{cn}). Допустимый же зазор (износ) наступает раньше окончания полного ресурса на величину, равную межремонтному ресурсу ($T_{мр}$).

Контрольные вопросы

1. Какие процессы происходят в поверхностном слое детали при изнашивании?
2. Что такое предельный и допустимый износ?
3. Какие существуют критерии обоснования предельного состояния деталей?
4. Как теоретически обосновать предельное состояние смазываемого сопряжения?
5. Как определить предельное состояние геометрической формы подшипника скольжения?

ЛЕКЦИЯ 8.

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

8.1 Виды резервирования

Резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций.

Резервирование – один из способов значительного повышения надежности объектов. При выходе из строя одного из основных элементов резервный элемент выполняет его функции, и объект не теряет работоспособности. Например, резервированием считается применение пусковых рукояток для двигателей, имеющих специальные системы пуска; запасных частей и даже резервных комбайнов и автомобилей на уборке урожая.

Существуют следующие виды резервирования.

Постоянное резервирование – резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений.

Резервирование замещением – резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только при отказе основного элемента.

Общее резервирование – резервирование, при котором резервируется объект в целом.

Смешанное резервирование – сочетание в объекте различных видов резервирования.

Резервирование без восстановления – резервирование, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически невозможно без нарушения работоспособности объекта в целом и (или) не предусмотрено эксплуатационной документацией.

Резервирование с восстановлением – резервирование, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически возможно без нарушения работоспособности объекта в целом и предусмотрено эксплуатационной документацией.

Мажоритарное резервирование – резервирование, при котором в нагруженном режиме находится нечетное количество (не менее трех) однотипных элементов и результатом работы объекта принимается одинаковый результат работы большинства основных элементов.

Структурное резервирование заключается в применении дополнительных элементов, не являющихся функционально необходимыми, и используемых только для замены отказавших основных. При таком резервировании отказ объекта наступает только после отказа основного и всех резервных элементов.

Функциональное резервирование – предусматривает возможность элементов выполнять дополнительные функции, сверх минимально необходимых для функционирования объекта. Например, в автомобиле ручной тормоз по основному назначению является стояночным, но может использоваться и при движении. Также рабочая тормозная система имеет два независимых тормозных контура – для передних и задних колес.

Нагрузочное резервирование заключается в повышении способности объекта к восприятию дополнительных нагрузок. Пути такого повышения:

- 1) увеличение запаса прочности использованием материалов более высокого качества и большей площади сечения деталей;
- 2) выбор рабочих режимов объекта менее напряженных, чем номинальный.

Нагрузочное резервирование обычно оценивается коэффициентом запаса прочности, который назначается повышенным для наиболее ответственных элементов. Для ряда отраслей коэффициенты запаса прочности нормированы. Например, коэффициент запаса для канатов грузоподъемных машин, в зависимости от режима работы и ответственности составляет от 4 до 15 (пассажирские лифты), коэффициент запаса тормозного момента механизма подъема равен от 1,5 до 2,5 и т. д.

Энергетическое резервирование – это запас мощности, который может быть использован в более тяжелых условиях эксплуатации или при старении объекта. Наиболее характерный пример – установка более мощного двигателя, чем это необходимо в нормальных условиях его работы.

Временное резервирование – это запас некоторого резервного времени, необходимого для восстановления технических характеристик объекта. Резервное время можно израсходовать на обнаружение и устранение отказов, переключение структурного резерва или повторение работ, обесцененных отказами.

Резерв времени может создаваться за счет увеличения времени, выделяемого объекту для выполнения задания и называемого оперативным временем. Он возникает и при создании запаса производительности всей системы или ее отдельных устройств, причем без увеличения оперативного времени. Запас производительности, в свою очередь, возникает при увеличении быстродействия элементов или при комплексировании нескольких объектов одинаковой или различной производительности для выполнения общего задания.

В системах, результат работы которых оценивается объемом производимой или обрабатываемой продукции, резерв времени можно создать за счет внутренних запасов выходной продукции. На машиностроительных предприятиях это детали, узлы, приборы и т. д. Пока запас не исчерпан, продукция будет поступать на выход, несмотря на частичное или даже полное прекращение

функционирования системы. Еще одним источником резерва времени может быть функциональная инерционность протекающих в системе процессов.

Информационное резервирование заключается в использовании нескольких адекватных источников информации, копий массивов информации или введении дополнительной информации, предназначенной для восстановления основной в случае ее искажения. Информационное резервирование обеспечивается путем: дублирования данных на различных устройствах; помехоустойчивого кодирования информации и т. д.

При резервировании одни элементы системы рассматриваются как основные, другие как резервные.

Резерв – совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования.

Основной элемент – элемент объекта, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва.

Резервируемый элемент – основной элемент, на случай отказа которого в объекте предусмотрены один или несколько резервных элементов.

Резервный элемент – элемент объекта, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего.

Кратность резерва – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых элементов, выраженное несокращенной дробью. Например, дублирование – резервирование, кратность которого равна единице.

Нагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, работающих в режиме основного элемента.

Облегченный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, работающих в менее нагруженном режиме, чем основной элемент, до начала выполнения ими функций основного элемента.

Ненагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, не функционирующих до начала выполнения ими функций основного элемента.

Переключающий элемент – элемент объекта, предназначенный для подключения исправного резервного элемента объекта вместо отказавшего основного элемента.

Вероятность успешного перехода на резерв – вероятность того, что переход на резерв произойдет без отказа объекта и без снижения качества функционирования объекта.

8.2 Последовательное соединение элементов

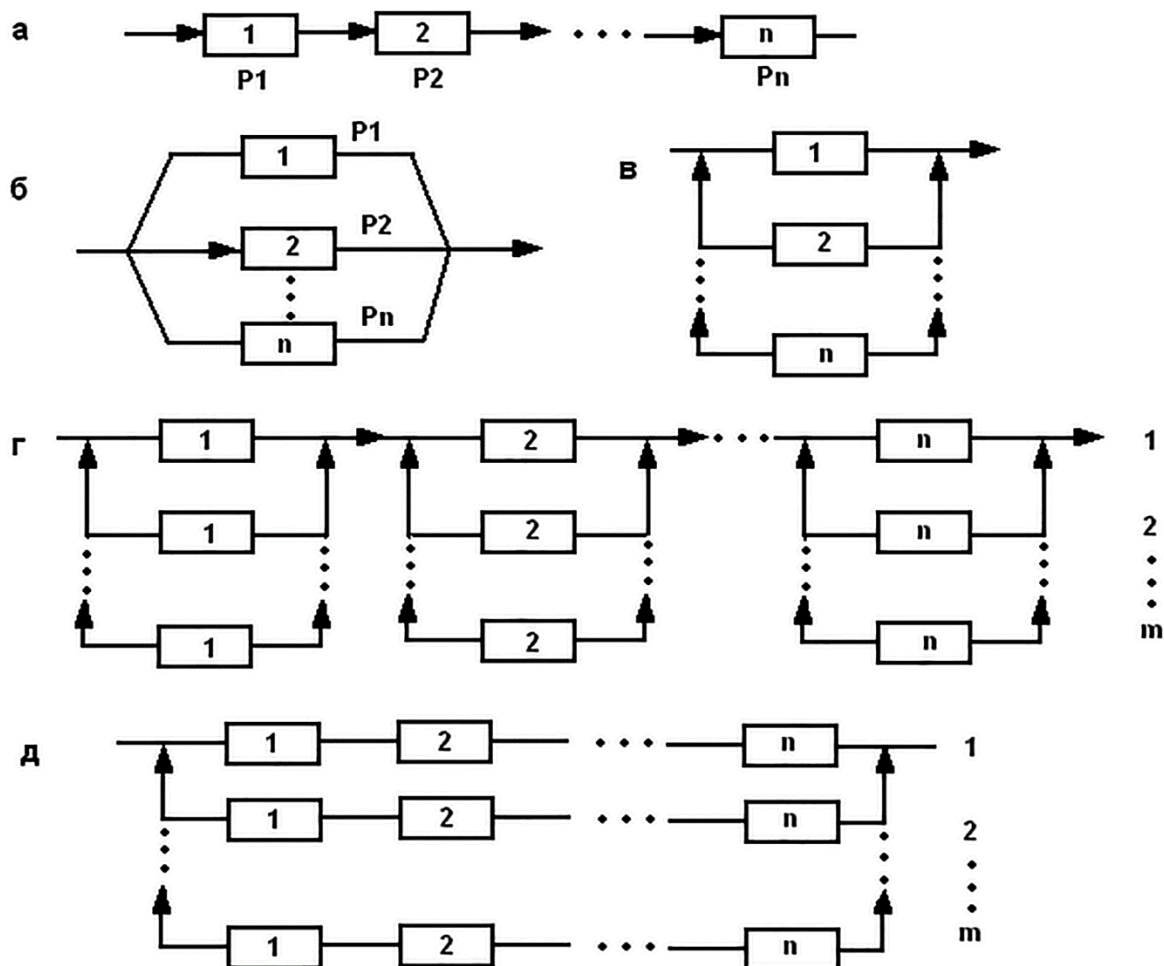
В надежности различают два основных вида соединения элементов: *последовательное* и *параллельное*.

Под **последовательным соединением элементов** (рис. 8.1, а) понимают такое соединение, при котором отказ одного какого-либо элемента влечет за собой отказ всей системы. Этому условию подчиняются большинство приводов и механизмов трансмиссии машин, так как выход из строя любой шестерни, вала, подшипника, ремня вызывает потерю работоспособности всей системы.

Если известна вероятность безотказной работы i -го элемента $P_i(t)$, с учетом вида соединения элементов безотказность сложной системы можно подсчитать по формулам теории вероятностей.

В этом случае вероятность безотказной работы определяется по формуле умножения вероятностей независимых событий и равна произведению вероятностей безотказной работы элементов (8.1):

$$P_{\text{посл}}(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i \quad (8.1)$$



- а) последовательное; б) параллельное с нагруженным или облегченным резервом;
в) резервирование замещением ненагруженным резервом; г) раздельное резервирование;
д) общее резервирование

Рисунок 8.1 – Схемы различных видов соединений элементов сложных систем

Вероятность отказа последовательного элемента определяют по выражению (8.2):

$$q_{\text{посл}} = 1 - P_{\text{посл}}(t) \quad (8.2)$$

При одинаковой вероятности безотказной работы элементов формула (8.1) приобретает следующий вид:

$$P_{\text{посл}}(t) = P^n \quad (8.3)$$

Так, например, если система состоит из 50 последовательно соединенных элементов с вероятностью безотказной работы каждого элемента на определенный промежуток времени (P_i) равной 99, то вероятность безотказной работы всей системы составит:

$$P_{\text{посл}}(t) = 0,99^{50} \approx 0,6$$

8.3 Параллельное соединение элементов

Параллельным соединением (рис. 8.1, б) называется совокупность элементов, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех параллельных элементов, входящих в совокупность. Параллельное соединение элементов в системе служит основой резервирования.

Следует заметить, что параллельное соединение не всегда может обеспечить необходимое резервирование. Если один и тот же элемент объекта (системы) подвержен различным по физической сущности отказам, то в зависимости от характера отказа резервный элемент необходимо включать либо последовательно, либо параллельно. Каждое из указанных включений в отдельности сможет обеспечить лишь частичное резервирование.

В качестве примера можно рассмотреть фильтр системы смазки или топливный фильтр, отказ которых может произойти либо в результате загрязнения фильтрующего элемента, либо в результате его разрушения. В первом случае резервирование можно обеспечить параллельным включением резервного фильтра, а во втором – последовательным.

Чтобы справиться с объемом сельскохозяйственных работ с учетом выхода из строя машин, хозяйства приобретают резервные тракторы, комбайны и сельскохозяйственные машины. Также для этой цели служит обменный фонд запасных агрегатов и деталей на складе (а иногда и непосредственно на машине). Это позволяет быстро заменить отказавшие объекты исправными.

Резервирование, повышая надежность технических систем, приводит к их усложнению и удорожанию. Резервирование методом введения запасных частей и обменных агрегатов удорожает эксплуатацию машин, часто создает неоправданные их запасы. Поэтому целесообразность его применения в каждом отдельном случае должна оцениваться с учетом экономической эффективности, а также с учетом требований, предъявляемых к объекту с точки зрения безотказности.

Например, автомобиль оснащен двумя тормозными системами (рабочей и стояночной), на нем установлены две или более фары. Если на него в целях резервирования установить два двигателя, две коробки передач и т. д., то он станет неоправданно сложным и громоздким.

При параллельном соединении, показанном на рисунке 8.1 (б), резервные элементы постоянно присоединены к основным, находятся в том же режиме, что и основной элемент, то есть они являются нагруженным резервом. В данном случае будет постоянное резервирование, при котором резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными (например, колеса, мосты автомобиля).

Если резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент, то это будет облегченное резервирование. Например, страховочные тросы; золотники гидрораспределителя для присоединения выносных гидроцилиндров по отношению к золотнику основного гидроцилиндра.

Вероятность безотказной работы при нагруженном резервировании может быть подсчитана следующим образом. Если обозначить за $q_1, q_2, \dots, q_m$ — вероятности появления отказа каждого из элементов за время t , то отказ системы в случае параллельного соединения произойдет при условии отказа всех элементов. Вероятность совместного появления всех отказов $q(t)$ по формуле умножения вероятностей составит:

$$q_{\text{пар}}(t) = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_m = \prod_{i=1}^m q_i \quad (8.4)$$

Поэтому безотказность системы с параллельным соединением элементов можно рассчитать по формуле (8.5):

$$P_{\text{пар}} = 1 - q_{\text{пар}}(t) \quad (8.5)$$

Например, если вероятность отказа каждого из трех элементов составляет 0,1, то $P_{\text{пар}}(t) = 1 - 0,1^3 = 0,999$.

Автомобиль имеет в системе освещения и сигнализации фары, подфарники и габаритные огни, которые соединены методом параллельного резервирования (по два изделия в каждой цепи). Отказ любого одного объекта (например, фары) не вызывает отказа в работе освещения и позволяет продолжить эксплуатацию автомобиля до возвращения в гараж и устранения отказа. В этом случае вероятность безотказной работы системы освещения и сигнализации определяется по формуле (8.5).

Чтобы определить надежность тормозной системы автомобиля, если известно, что вероятность безотказной работы рабочей тормозной системы составляет 0,98, а стояночной – 0,97, можно воспользоваться формулой (8.5). Для начала найдем вероятность отказа каждой системы:

$$q_{\text{тормозной}} = 1 - 0,98 = 0,02;$$

$$q_{\text{стояночной}} = 1 - 0,97 = 0,03$$

Отсюда вероятность отказа всей тормозной системы составит:

$$q_{\text{торм.сист.}} = 0,02 \cdot 0,03 = 0,0006$$

Вероятность безотказной работы соответственно равна:

$$P_{\text{торм.сист.}} = 1 - 0,0006 = 0,9994$$

8.4 Параллельно-последовательное соединение элементов

На практике часто встречаются структурные схемы, состоящие из параллельных и последовательно соединенных элементов. В этом случае вероятность безотказной работы вычисляют с использованием формул для параллельно-последовательных схем.

Пример. Требуется найти вероятность безотказной работы автомобиля, если вероятность безотказной работы каждого элемента равна 0,9 (рис. 8.2).

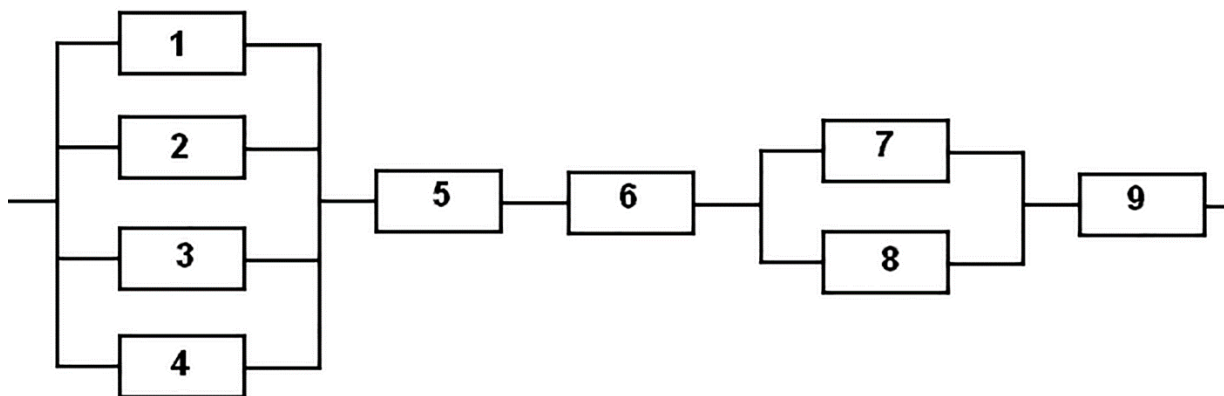


Рисунок 8.2 – Структурная схема автомобиля

В данном случае автомобиль представлен схемой четырех параллельно соединенных элементов (четыре цилиндра двигателя 1, 2, 3, 4), последовательно с которыми соединяются два элемента трансмиссии 5 и 6 (например, коробка передач и задний мост); двумя различными системами торможения (параллельные элементы 7 и 8), включенных последовательно с элементами 5 и 6. Последний, последовательно включенный элемент 9, соответствует рулевому управлению.

Решение. Для определения вероятности безотказной работы при параллельном и последовательном соединении элементов, представленном на рисунке 8.2, воспользуемся формулами (8.1) и (8.5).

В связи с тем, что в данном примере вероятности безотказной работы элементов одинаковы, расчет вероятности безотказной работы параллельно соединенных элементов можно вести по упрощенной формуле (8.6):

$$P_{\text{пар}} = 1 - (1 - P_i)^m \quad (8.6)$$

Поэтому вероятность безотказной работы двигателя составит:

$$P_{1-4} = 1 - (1 - P_i)^4$$

Вероятность безотказной работы систем торможения составит:

$$P_{7-8} = 1 - (1 - P_i)^2$$

Таким образом, вероятность безотказной работы автомобиля будет равна:

$$\begin{aligned} P_a &= P_{1-4} \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_{7-8} \cdot P_9 = \\ &= [1 - (1 - 0,9)^4] \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot [1 - (1 - 0,9)^2] \cdot 0,9 = 0,72 \end{aligned}$$

Если бы не было включенных параллельно элементов, то вероятность безотказной работы равнялась:

$$P_a = P_{1-4} \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_{7-8} \cdot P_9 = 0,9^5 \approx 0,6$$

Это значительно ниже ранее определенного значения.

8.5 Ненагруженный резерв

*Если резервный элемент (объект) практически не несет нагрузки, то он называется **ненагруженным резервом** (рис. 8.1, в). В этом случае используется резервирование замещением, при котором функции передаются резервному элементу только после отказа основного элемента.*

*Резервирование замещением, при котором группа основных элементов резервируется резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент в данной группе, называется **скользящим резервированием**.*

Зная состав машинно-тракторного парка и количественные характеристики надежности машин и их элементов, можно рассчитать, сколько запасных сборочных единиц и деталей следует иметь в хозяйстве. Расчеты на надежность показывают, что в обменном фонде выгоднее иметь лишь отдельные сборочные единицы сложных агрегатов. Если в обменном фонде имеется двигатель в сборе, то это позволит пустить в работу только один неработоспособный трактор. С другой стороны, имея в обменном фонде сборочные единицы двигателя (узлы топливной аппаратуры, головку блока в сборе, муфту сцепления и т. д.) можно восстановить работоспособность нескольких тракторов. Редко бывает, чтобы у всех неисправных тракторов одновременно произошел отказ одних и тех же деталей. Расчеты по теории надежности показывают, что один запасной двигатель, расчлененный на отдельные элементы, дает такой же эффект, как и пять запасных двигателей, хранящихся в сборе.

*Резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы, называется **раздельным резервированием*** (рис. 8.1, г). При раздельном резервировании имеется возможность включить резервный элемент при выходе из строя любого основного элемента, что значительно повышает надежность объекта (технической системы). Вероятность безотказной работы системы, состоящей из n последовательно соединенных элементов, в этом случае вычисляют по формуле (8.7):

$$P_p = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_i) \right] \quad (8.7)$$

При равнонадежных элементах, когда $P_i = P$, эта формула примет вид выражения (8.8):

$$P_p = [1 - (1 - P)^m]^n \quad (8.8)$$

Например, при $n = 4$, $m = 3$ и $P = 0,9$:

$$P_p = [1 - (1 - 0,9)^3]^4 = 0,996$$

Это соответствует очень высокому уровню безотказности объекта.

Резервирование, при котором резервируется объект в целом, называется **общим резервированием** (рис. 8.1, д). При общем резервировании вероятность безотказной работы определяется с учетом формул (8.1) и (8.5):

$$P_o = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j) = 1 - \prod_{j=1}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n P_i \right) \quad (8.9)$$

где P_i и P_j – вероятность безотказной работы одного элемента и всей цепи соответственно;

m и $(m-1)$ – всего цепей и резервных.

Для случая равной надежности всех элементов, когда $P_i = P$, формула (8.9) принимает вид выражения (8.10):

$$P_o = 1 - (1 - P^n)^m \quad (8.10)$$

Подставив, например, в эту формулу $n = 4$, $m = 3$ и $P = 0,9$, как и в предыдущем примере, получим:

$$P_o = 1 - (1 - 0,9^4)^3 = 0,958$$

Вероятность безотказной работы при общем резервировании ниже, чем при раздельном. Поэтому, например, выгоднее иметь сменный предохранительный клапан в запасе, чем запасной гидрораспределитель в сборе.

Смешанное резервирование *предусматривает совмещение различных видов резервирования.*

Например, на практике может применяться общее резервирование отдельных объектов и раздельное резервирование наиболее ответственных и менее надежных элементов. Расчеты безотказности при смешанном резервировании ведутся методами, аналогичными описанным выше.

Резерв бывает *восстанавливаемый* и *невосстанавливаемый*, в зависимости от того, подлежит или не подлежит восстановлению его работоспособность в случае отказа.

Резервированием с восстановлением называется такое резервирование, при котором работоспособность основного и резервного элементов в случаях их отказов подлежит восстановлению в процессе эксплуатации объекта.

Контрольные вопросы

1. Для чего нужно резервирование?
2. Какие существуют виды резервирования?
3. Что такое основной и резервный элементы?
4. Что такое последовательно-параллельное соединение элементов?
5. Что такое ненагруженный резерв?

ЛЕКЦИЯ 9.

ИСПЫТАНИЕ ТЕХНИКИ НА НАДЕЖНОСТЬ

9.1 Термины обеспечения и анализа надежности

Нормирование надежности (объекта) – *установление в нормативной и технической документации количественных и качественных требований к надежности объекта.*

Нормирование надежности включает выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности; установление и технико-экономическое обоснование значений показателей надежности объекта и его составных частей; задание требований к точности и достоверности исходных данных; установление критериев отказов, повреждений и предельных состояний; задание требований к методам контроля надежности на всех этапах жизненного цикла объекта.

Программа обеспечения надежности – *документ, устанавливающий перечень и порядок проведения на разных стадиях жизненного цикла объекта организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение надежности и (или) на ее повышение.*

Оценка надежности – *определение точечных и интервальных оценок показателей надежности объекта.*

Прогнозирование надежности – *определение оценки показателя надежности объекта на основании предшествующего опыта или путем экстраполяции на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.*

Расчетный метод оценки надежности – *метод, основанный на вычислении оценок показателей надежности по справочным данным о надежности*

компонентов и комплектующих элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчета.

Расчетно-экспериментальный метод оценки надежности – метод оценки надежности объекта путем расчета, при котором оценки показателей надежности всех или некоторых составных частей объекта определены экспериментально.

Экспериментальный метод оценки надежности – метод оценки показателей надежности путем статистической обработки данных, полученных при испытаниях или эксплуатации объекта в целом.

Анализ отказов – исследование отказов, направленное на определение факторов, влияющих на надежность (причин отказов, составляющих времени восстановления, эффективности резервирования и т. д.).

9.2 Классификация испытаний

Испытание объекта является важным этапом в обеспечении его надежности и требует больших затрат труда и средств. Испытания на надежность проводятся в заданных условиях с заданной точностью с целью определения или контроля показателей надежности, принятых при проектировании. Важно, чтобы для проведения испытаний выделялся квалифицированный персонал. По результатам испытаний вносятся изменения в конструкцию, а также в эксплуатационные и технологические документы.

Испытания классифицируют следующим образом.

По целям: контрольные и исследовательские (определительные).

По срокам проведения: ускоренные и неускоренные.

По этапу проведения: эксплуатационные и производственные.

По методам проведения: *разрушающие и неразрушающие.* Разница в том, что объект при первом виде испытания оказывается непригодным для дальнейшего применения, а после испытания без разрушения его можно использовать. Экономически целесообразно проводить испытания без разрушения. Но иногда бывает, что выгоднее провести меньшее число разрушающих испытаний, чем большее число испытаний без разрушений. Очень высокая стоимость отдельных изделий иногда делают обязательным проведение испытаний без разрушений.

По месту проведения: *в естественных и имитированных (лабораторных) условиях.* Тем самым используются либо естественные внешние факторы в реальных условиях эксплуатации, либо искусственно создаваемые в лабораториях. Испытания сельхозмашин из-за сезонности их работы производят в обоих условиях, то есть совмещают.

Большое значение для экспериментальной оценки надежности имеют испытания на специальных стендах. Преимущество стендовых испытаний заключается в максимальном приближении к эксплуатационным условиям работы, в то же время исключаются трудности, связанные с проведением эксплуатационных испытаний.

9.3 Виды испытаний

Исследовательские (определятельные) испытания *проводят для оценки показателей надежности у вновь разработанных или модернизированных машин. По ним определяется соответствие изделия государственным стандартам или техническим условиям.* Исследовательские испытания могут быть стандартными или специальными. Стандартные устанавливаются требованиями государственных стандартов, а также правилами и инструкциями; а

специальные – программами испытаний. При этом импортные изделия испытываются по отечественным государственным стандартам.

Контрольные испытания на надежность – *испытания, проводимые для проверки соответствия показателей надежности заданным требованиям.* По ним проверяют соответствие количественных показателей надежности требованиям стандартов или техническим условиям. Они подразделяются на:

1) *предварительные испытания* опытных образцов, которые проводятся предприятием-изготовителем для решения вопроса о возможности предъявления продукции на государственные испытания;

2) *государственные испытания* опытных образцов, которые проводят для решения вопроса о целесообразности производства изделия и передачи его в эксплуатацию;

3) *приемо-сдаточные испытания*, которые проводит изготовитель при приемо-сдаточном контроле;

4) *типовые испытания* – это контрольные испытания готовой продукции, проводимые до и после внесения изменений в конструкцию или технологию изготовления; их целью является проверка эффективности внесенных изменений или сравнение качества продукции, выпущенной в разное время.

Контрольные испытания необходимы, потому что в процессе производства на изготавливаемые объекты действуют факторы, которые приводят к понижению надежности. Эти факторы делят на две группы: 1) грубые нарушения норм технологического процесса, выражающиеся в виде ошибок монтажа и скрытых дефектов в комплектующих изделиях; 2) непредусмотренные изменения первоначальных свойств элементов и их материалов, понижающих надежность.

Дефекты первой группы обнаруживают путем полной проверки системы на соответствие техническим требованиям. Контроль дефектов второй группы

во многих случаях связан с существенной выработкой ресурса или даже с разрушением контролируемых объектов.

Если контроль прост и стоимость его невелика, то используют сплошной контроль (проверяют все изделия). Но чаще применяется выборочный (статистический) контроль. При выборочном контроле проверяют часть изделий из партии (выборку), и по ней принимается заключение о надежности всей партии.

Различают два вида выборочного контроля надежности: *контроль по альтернативному признаку* и *контроль по количественному признаку*.

При первом виде контроля все изделия в выборке разделяются на две группы: годные и дефектные. Оценку партии проводят по доле дефектных изделий в общем числе проверенных. Испытания проводят в течение заданного времени, фиксируется только число отказавших изделий.

При контроле по количественному признаку у каждого изделия определяют какие-либо параметры и оценку партии проводят по статистическим характеристикам распределения этих параметров. При испытаниях, например, на долговечность все изделия выборки доводят до отказа, при этом фиксируя наработку каждого из них, а затем, анализируя статистические характеристики наработки, устанавливают соответствие всей партии нормативам надежности.

Контрольная обкатка проводится для проверки надежности объектов первичного и вторичного производства, главное ее назначение – определение дефектов изготовленных или восстановленных деталей и машины в целом. Обкатка объектов вторичного производства имеет свои особенности, связанные с использованием при сборке деталей с номинальными и ремонтными размерами, а также допустимым износом.

Отбраковочные испытания – *испытание или набор испытаний, предназначенные для обнаружения и удаления из выборки дефектных объектов или объектов с высокой вероятностью ранних отказов.*

Испытания машин после ремонта *проводят для проверки правильности сборки агрегатов, правильности регулировки, определения качества выполненного ремонта.*

Последовательность таких испытаний следующая:

- 1) внешний осмотр и проверка комплектации;*
- 2) обкатка в холостом режиме;*
- 3) увеличение нагрузки вплоть до эксплуатационной.*

Продолжительность обкатки составляет от 8 до 70 часов и зависит от типа машины. Время обкатки на холостом ходу и при 10-процентной загрузке составляет 20–30 % времени от общей продолжительности; при нагрузке от 30 до 50 % от номинальной – 70–50 % времени. В остальное время проводится обкатка с нарастающей нагрузкой вплоть до максимальной.

При выявлении дефектов испытания могут быть прерваны и проведена частичная разборка с устранением дефекта и последующими дополнительными испытаниями.

Ресурсные испытания *проводятся для определения ресурса машины или детали до капитального ремонта либо на полный срок службы.* Наиболее точные результаты дают испытания машин в условиях эксплуатации. Но для этого требуется слишком длительное время. Поэтому для определения ресурса наряду с эксплуатационными применяют ускоренные испытания.

Эксплуатационные испытания на надежность – *испытания, проводимые в реальных условиях эксплуатации объекта.*

Лабораторные испытания на надежность – *испытания, проводимые в лабораторных условиях или заводских условиях.* Они проводятся в заданных и контролируемых условиях, с имитацией или без имитации эксплуатационных условий. Испытания с имитацией относят к нормальным испытаниям на надежность.

Нормальные испытания – лабораторные испытания на надежность, методы, режимы и условия проведения которых максимально приближены к эксплуатационным для объекта.

Ускоренные испытания – лабораторные испытания на надежность, методы, режимы и условия проведения которых обеспечивают получение информации о надежности объекта в более короткий срок, чем при испытаниях, проводимых в реальных условиях эксплуатации объекта.

Сокращение времени на проведение испытаний является первостепенной задачей для экономии средств и сокращения сроков освоения новой техники. Особенно это важно для исследования сельскохозяйственных машин, занятых неполный сезон. Ускоренные испытания не должны изменять основные виды или механизмы отказов или их относительное преобладание. Их можно подразделить на два вида: уплотненные (по времени) и форсированные (ужесточенные по факторам нагружения).

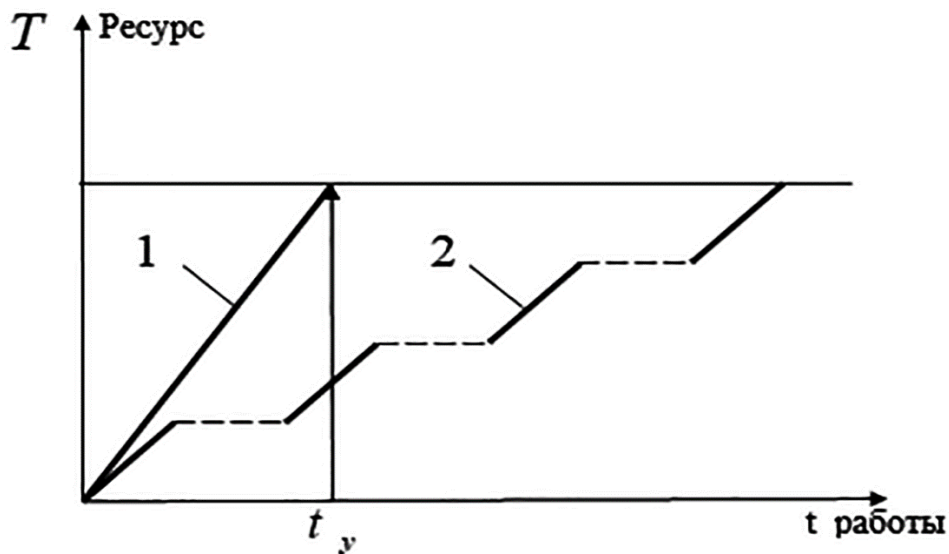
Уплотненными по времени называют такие испытания, при которых ускоренное получение информации достигается без форсирования процесса изнашивания. Сроки испытаний сокращаются за счет максимального использования календарного времени, то есть круглосуточными испытаниями, ликвидацией холостых ходов и простоев, что позволяет увеличить наработку в сравнении с нормальной эксплуатацией, где имеются простои в течение суток. При этом воспроизводятся полностью эксплуатационные нагрузки, действующие на механизмы, как по величине, так и по частоте приложения. Коэффициент ускорения можно определить по формуле (9.1):

$$k_y = \frac{t_p + t_x}{t_p} \quad (9.1)$$

где t_p – время непрерывной работы;

t_x – время холостых ходов.

Наглядно оценить сокращение времени можно по графику (рис. 9.1).



1 – ускоренное испытание; 2 – испытание в обычных условиях
Рисунок 9.1 – Диаграмма уплотнения испытаний во времени

Большое достоинство уплотненных испытаний – достижение эффекта ускорения без искажения физической картины изнашивания. Однако следует иметь в виду, что этот метод ускорения испытаний можно использовать только после тщательного анализа влияния непрерывной работы на отдельные детали и машину в целом.

Ужесточенными по нагружению испытаниями называются такие, при которых ускоренное получение информации достигается за счет форсирования процесса разрушения (увеличения скоростей, нагрузок, температур, использование абразива, агрессивной среды и т. д.). Эти испытания включают:

- 1) однофакторные, проводимые за счет увеличения одной из нагрузок;
- 2) многофакторные, когда увеличивают и учащают сразу несколько видов нагрузок.

Для оценки эффективности таких испытаний используют коэффициент ускорения, рассчитываемый по формуле (9.2):

$$k_y = \frac{t_n}{t_\phi} \quad (9.2)$$

где t_n – наработка изделия в нормальных условиях эксплуатации до предельного состояния;

t_ϕ – время испытания в форсированном режиме до того же предельного состояния.

При разработке методов ускоренных испытаний следует учитывать, что форсирование режимов не беспредельно. Оно может привести к искажению результатов испытания, так как каждый процесс изнашивания имеет свою критическую зону, за которой происходят качественные изменения. Поэтому режимы ускоренных испытаний следует выбирать так, чтобы не была достигнута критическая зона, и качественная характеристика изнашивания осталась неизменной, иначе результаты не будут соответствовать данным эксплуатации. А если отказы при форсированных испытаниях не будут повторяться в эксплуатации, то смысл таких испытаний теряется.

Чтобы обеспечить эффективность ужесточенных испытаний необходимо соблюдать их подобие с эксплуатационными. Оно состоит в том, чтобы физическая картина отказов при ужесточенных и эксплуатационных испытаниях была одинакова по характеру разрушения (место разрушения, вид деформированного состояния, температурные режимы, форма изношенной поверхности, вид износа и т. д.). Для подобия эксплуатационных и ускоренных испытаний необходимо, чтобы коэффициент ускорения являлся величиной постоянной, равной соотношению средних показателей времени безотказной работы на стенде (t_c) и при эксплуатации ($t_э$):

$$k_y = \frac{t_c}{t_э} \quad (9.3)$$

Указанные зависимости верны для любого закона распределения.

Ускоренные испытания, связанные с отказами в результате износа, можно прекратить, если установлена функциональная зависимость величины износа от наработки.

9.4 Планы испытаний

Для проведения испытаний разрабатывают программу и методику. В программу входят цель; режим и длительность испытаний; перечень показателей надежности и план испытаний.

План испытаний на надежность – совокупность правил, устанавливающих объем выборки, порядок проведения испытаний, критерии их завершения и принятия решений по результатам испытаний на надежность.

План должен содержать число испытываемых образцов; стратегию проведения испытаний (с заменой отказавших изделий или без замены); условия прекращения испытаний; число наблюдений и отрицательных исходов этих наблюдений, позволяющих принять решение о соответствии требованиям; правила принятия решения.

При испытаниях на надежность наблюдением может быть время безотказной работы изделия, продолжительность его восстановления и т. д. Отрицательным исходом наблюдения – наступление отказа, предельного состояния или невозможность восстановления в течение заданного времени.

Объектом экспериментальной оценки является обычно партия изделий, состоящая из N образцов. Если N велико, то испытаниям подвергают не все образцы, а некоторое их меньшее количество, то есть выборку. И одной из основных задач планирования выборочных испытаний является определение минимального объема выборки, при котором обеспечивается достоверность результатов.

Испытания могут осуществляться по различным планам. Планы обозначают тремя латинскими буквами. Первая буква N означает число объектов, поставленных под наблюдение. Вторая – условия проведения: U – отказавшие объекты не заменяют новыми; R – отказавшие объекты заменяют или ремон-

тируют. Третья – условия окончания испытаний: N – доведение до предельного состояния всех объектов; T – доведение до установленной наработки; r – число отказов до возникновения которых ведутся наблюдения.

Рассмотрим основные планы испытаний.

1. План испытаний NUT , по которому испытывается N объектов. Отказавшие во время испытания объекты не восстанавливают и не заменяют (U), испытания прекращают по истечению времени (наработки) T для не отказавших объектов. Если долговечность объекта велика, то используют план наблюдений NUT с ограниченной наработкой T до конца наблюдения. Полученная при таком плане наблюдения информация называется усеченной.

2. План NUr . Наблюдения ведут до фиксации у всех N машин заранее заданного числа отказов r . Его используют при определении ресурса объектов с небольшой долговечностью. При $r = N$ получают наиболее достоверную информацию, называемую полной или неусеченной.

3. План NRr тот же самый, что и план NUr , при условии, что вышедшие из строя машины восстанавливают для повторного испытания.

4. План испытаний NRT , согласно которому наблюдения ведут за N машинами; отказавшие во время испытаний объекты заменяют новыми (R); испытания ведут до наработки T . Данный план широко используют при сборе информации: о показателях безотказности автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин, об удельных затратах времени и денежных средств на устранение эксплуатационных отказов и проведение технического обслуживания.

5. План испытаний NMS , согласно которому испытывают N объектов; после каждого отказа объект восстанавливают (M); по суммарной наработке и числу отказов в любой момент принимают решение о приемке, выбраковке или продолжении испытаний (S). Испытания прекращают решением о приемке или браковке.

Информацию о показателях ремонтпригодности и сохраняемости собирают по произвольному плану наблюдения в процессе ремонта машин или их постановки на хранение. Информацию о комплексных показателях надежности (удельная стоимость надежности, коэффициенты готовности и технического использования) собирают при смешанных планах наблюдения (комбинация информации о показателях долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости).

9.5 Требования, предъявляемые при испытаниях

Испытания на надежность должны проводиться по утвержденным программам и аттестованным методикам. Важное значение имеет программа испытаний, в которой расписываются виды, этапы и место испытаний, а также оборудование, показатели и квалификация персонала.

Программы и методики разрабатывают на основе технического задания и конструкторской документации в соответствии с требованиями нормативно-технических документов по организации испытаний и типовых программ испытаний на надежность (при их наличии). Типовые программы испытаний составляют для групп однородной продукции.

Окончательный успех или неуспех программы испытаний может зависеть от того, с какой тщательностью выбиралось, конструировалось, доставлялось и проверялось испытательное оборудование. Оно определяет точность измерений, воспроизводимость, возможность правильной интерпретации результатов и стоимость выполнения программы испытаний. Это оборудование часто оказывается более сложным, чем испытываемый объект.

Испытательное оборудование обычно делится на оборудование общего назначения и специальное в зависимости от того, применяется ли

оно только для одного или нескольких видов испытаний. Нужно стремиться к выбору стандартного оборудования общего назначения. Погрешности испытательного оборудования должны быть минимальными, а оборудование – поверенным.

Контрольные вопросы

1. Для чего нужны испытания техники?
2. Какие бывают виды испытаний?
3. Как добиваются сокращения времени на проведение испытаний?
4. Какие существуют планы испытаний?
5. Какие требования предъявляют при испытаниях?

ЛЕКЦИЯ 10.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

10.1 Стадии обеспечения надежности машин

Разрабатываемые конструкции должны обладать простотой, рациональной компоновкой узлов, технологичностью, ремонтпригодностью, достаточной прочностью и отвечать требованиям технической эстетики и удобства в эксплуатации.

При обеспечении прочности следует учитывать, что она бывает двух видов. Объемная прочность связана с физическими механизмами разрушения. Для нее существуют инженерные методы расчета. Но обеспечение объемной прочности не гарантирует поверхностную прочность деталей. Процессы поверхностного разрушения при изнашивании коренным образом отличаются от объемного. Это вызывает основные трудности при выборе материалов и их сочетаний в узлах машин.

Необходимый уровень надежности машины закладывается на всех стадиях ее существования – при проектировании, производстве и эксплуатации. В общем виде факторы, влияющие на надежность и долговечность, можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} N_{\text{п}} &\geq N_{\text{пр}} \geq N_{\text{э}}; \\ D_{\text{п}} &\geq D_{\text{пр}} \geq D_{\text{э}} \end{aligned} \quad (10.1)$$

где $N_{\text{п}}$ – надежность при проектировании;

$N_{\text{пр}}$ – производственный уровень надежности;

$N_{\text{э}}$ – эксплуатационная надежность;

$D_{\text{п}}$ – долговечность при проектировании;

$D_{\text{пр}}$ – производственный уровень долговечности;

$D_{\text{э}}$ – долговечность при эксплуатации.

Производственный и эксплуатационный уровни надежности являются многозначными, то есть характеризуются рассеиванием и значительными колебаниями по величине. Рассеивание наблюдается даже в том случае, когда одномарочные машины (агрегаты) эксплуатируются в одинаковых условиях, и оно существенно увеличивается при разных условиях эксплуатации.

10.2 Обеспечение надежности при проектировании

Чтобы машины были надежными, при их проектировании необходимо учитывать следующие факторы:

1. Прогрессивность комплектующих деталей и применяемых материалов, оптимальную технологичность конструкции, применение унифицированных и стандартных деталей и узлов.

2. Доступность всех частей машин для осмотра, контроля, ремонта или замены. Это является важным условием для поддержания надежности в период эксплуатации.

3. Оптимальную долговечность основных агрегатов и деталей, сводить ремонтные операции к замене недолговечных дешевых деталей с минимальной затратой времени.

4. Локализацию динамических нагрузок и вибраций, возникающих при работе машин, так как они существенно влияют на интенсивность изнашивания, усталостную прочность и появление непредвиденных поломок.

5. Необходимо подбирать материалы трущихся пар так, чтобы изнашиванию подвергались наиболее простые и дешевые в изготовлении детали.

Снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт техники зависит от совершенства их конструкции. Отсюда следует вывод, что важная роль в создании каждой машины принадлежит конструктору. Именно конструктор изначально закладывает определенный уровень надежности в машину. Если

машина изначально спроектирована ненадежной, то это нельзя исправить ни в процессе производства, ни при эксплуатации.

В ходе проектирования каждому конструктору приходится решать задачи:

1) спроектировать объект так, чтобы он был способен выполнять свои функции;

2) спроектировать объект так, чтобы он был надежен в эксплуатации, служил требуемый срок и чтобы его легко можно было ремонтировать.

Любой конструктор сначала решает первую задачу, потому что если заданные технические характеристики не могут быть достигнуты, нет смысла тратить время на решение других задач. Но как бы высоки не были технические характеристики изделия, пользы от него будет мало, если оно окажется ненадежным и будет часто отказывать в работе.

Однако до последнего времени эти две задачи занимали неравнозначные положение. В технических условиях подробно оговаривались все основные характеристики, кроме требований к надежности. В настоящее время разработаны специальные методики выбора показателей надежности, которые определяются государственными стандартами.

Одним из способов повышения надежности является создание больших запасов прочности конструкции. Например, максимальное усилие по техническим условиям составляет 400 кг, а конструкцию рассчитывают на 4 000 кг. Или в гидравлической системе с номинальным давлением 10 кг/см² применяются шланги, рассчитанные на 100 кг/см². А в электрических схемах применяют электронные элементы, рассчитанные на гораздо большее напряжение и силу тока, чем требуется, так что их нагрузочный потенциал используется только на 10–15 %. Однако такой путь не всегда приемлем из-за возрастания массы и металлоемкости конструкции.

Также обеспечить высокую надежность помогает *упрощение и стандартизация*. Чем проще конструкция, тем выше ее надежность. Уменьшение количества деталей, а также их различных типов является очевидным методом повышения надежности. Конечно, любая новая машина должна быть оригинальной. Но это не означает, что, проектируя ее, конструктор должен заново изобрести каждый узел и деталь. Самая оригинальная машина может быть создана из стандартных деталей и узлов.

По данным научного автотранспортного института (НАТИ), в тракторостроении применяется 180 типоразмеров гаек, 89 типоразмеров гаечных ключей. В сельскохозяйственных машинах используется 124 типа колес. Все это приводит к неоправданному увеличению номенклатуры запасных частей. Для тракторов она достигает 12 тысяч наименований, а общая номенклатура запасных частей для всех сельскохозяйственных машин превышает 56 тысяч наименований. Это затрудняет эксплуатацию сельскохозяйственной техники, усложняет обслуживание и ремонт, снижая ее эксплуатационную надежность.

Если при проектировании новых машин шире использовать типовые узлы и детали, то номенклатуру запасных частей можно существенно сократить. Это выгодно экономически, так как типовые узлы в несколько раз дешевле. При этом намного бы сократились сроки проектирования и ускорилось создание новых машин, а также повысилась бы надежность машин – потому что типовые узлы и детали изготавливаются на специализированных заводах, они уже испытаны на других конструкциях, их надежность проверена. Наконец, использование унифицированных узлов и деталей делает легкой их замену и, следовательно, облегчает эксплуатацию и ремонт машин. В связи с этим в настоящее время в документацию введен показатель унификации.

Проектируя новую машину, конструктор должен учитывать также *фактор инженерной психологии*. Следует предусмотреть, чтобы неправильная

сборка или неправильное использование созданной конструкции были бы затруднительными. Например, разъемы разных кабелей должны отличаться по форме, чтобы их нельзя было неправильно соединить.

Большое значение для повышения надежности имеет *возможность проведения диагностики и контроля*. Разработчик по возможности должен так разрабатывать схему узлов, чтобы они могли быть подвергнуты полной функциональной проверке без разборки.

Одним из важных методов для достижения высокой конструктивной надежности, является *резервирование*. Выполнение функции одной из двух параллельных систем обеспечивает большую надежность, чем только одна система. Иногда автоматическое устройство дублируется с помощью ручного (при участии оператора). Резервирование обеспечивается также применением нескольких двигателей, например, на морских судах и самолетах. Следует иметь в виду, что резервирование как метод конструирования имеет определенные ограничения и не может рассматриваться как универсальное средство. Некоторые из этих ограничений заключаются в следующем:

1) ограничения в габаритных размерах и массе могут привести к двум дублированным системам, в которых используются менее надежные малогабаритные элементы; при этих условиях надежность резервированной системы может оказаться даже меньше, чем нерезервированной;

2) удары, вибрации или изменения температуры, которые могут вызвать выход из строя одной системы, вероятно, вызовут выход из строя обеих систем; при таких условиях лучше направить усилия конструктора на защиту от перегрева, на ослабление вибраций или на другую защиту от воздействия окружающих условий;

3) не всегда то, что кажется резервированием, оказывается им на самом деле; так, например, две трубы, используемые для параллельной передачи

жидкости (с необходимыми контрольными клапанами и т. д.), являются полностью резервированными только в том случае, если каждая труба в отдельности рассчитана на максимально требуемый поток жидкости.

Самый эффективный метод повышения надежности заключается в том, чтобы *проявлять глубокое внимание ко всем случаям отказов и неувязкам в конструкции*, сведения о которых поступают от службы контроля качества продукции, программ испытаний, из отчетов о неисправностях и отказах при эксплуатации. Оперативные корректировочные меры могут в значительной степени повысить надежность техники.

При создании новых машин (узлов, деталей) проектировщик должен выбирать такие геометрические формы, размеры деталей и условия их работы, при которых скорости изнашивания будут минимальными. Путем оптимизации нагрузок и скоростей скольжения, выбора рациональных посадок и устройств для смазки трущихся поверхностей, разработчик оказывает существенное влияние на долговечность создаваемых машин.

Конструкционные методы снижения изнашивания включают:

- 1) сочетание твердого материала с мягким (устраняет заедание (закаленный вал и баббитовый вкладыш));
- 2) сочетание твердого материала с твердым (повышает износостойкость);
- 3) исключение сочетания одноименных материалов и мягкого материала с мягким;
- 4) применение пористых, порошковых антифрикционных материалов (хорошо удерживают масло);
- 5) применение принципиально новых полимеров и композиций;
- 6) замена пар трения скольжения на пары трения качения;
- 7) создание условий для жидкостного трения.

Улучшая конструкцию отдельных деталей и механизмов, можно повысить надежность агрегатов в 1,5–2 раза.

Однако в большинстве случаев техника утрачивает работоспособность вследствие постепенных отказов, которые возникают из-за недостаточной прочности поверхностей трущихся деталей. Для придания оптимальных свойств поверхностям деталей существуют технологические методы.

Есть еще одна важная проблема, которой не всегда уделяется должное внимание при проектировании состоит в обеспечении кратных сроков службы узлов и деталей. Во многих машинах разница в сроках службы бывает очень большой. У трактора МТЗ существует 39 групп деталей, у которых изнашивание происходит с разной скоростью. Разница в сроках службы деталей сопровождается понижением долговечности этих узлов в целом.

Например, поршни двигателей Д-38 имеют меньшую износостойкость, чем поршневые пальцы и втулки верхних головок шатунов. Однако замена поршней сопровождается заменой и поршневых пальцев, и втулок шатунов. Так растет цепочка заменяемых деталей. В результате 60–80 % деталей, заменяемых при ремонте двигателей, имеют износ в пределах 20–30 % от нормального, то есть ресурс этих деталей используется всего на 20–30 %. Поэтому одна из важных задач проектирования – *определение и обоснование оптимальных сроков службы узлов и деталей* с тем, что бы максимально сократить разброс этих сроков.

При конструировании узлов трения необходимо выбрать такую форму рабочих поверхностей и сочетание материалов, чтобы износостойкость этого узла была повышенной, а повреждаемость – отсутствовала. Оптимальные условия работы подшипников скольжения могут быть обеспечены при гидродинамическом, газодинамическом, а также гидро- и газостатическом трении, при которых достигается полное разделение трущихся поверхностей. Однако эти режимы во многих случаях являются труднодостижимыми.

Поэтому большинство узлов эксплуатируют в условиях несовершенной смазки. Основным принципом проектирования является обеспечение режима

нормального трения в заданном диапазоне скоростей и нагрузок. Это может быть достигнуто правильным выбором материалов, а также конструктивными мероприятиями, направленными на устранение причин, вызывающих конкретный вид повреждаемости.

При низких скоростях скольжения и силовых перегрузках, а также нарушениях подачи смазки может возникнуть схватывание первого рода. Поэтому при разработке узлов необходимо исключить проявление местного повышения нагрузок при перекосах и перегрузках.

При высоких скоростях скольжения и тепловых перегрузках в зоне трения может возникнуть схватывание второго рода. Поэтому необходимо предусмотреть возможность снижения тепловой напряженности за счет улучшения теплоотвода и применения систем охлаждения.

Фреттинг-процесс возникает при микросмещениях и динамическом характере нагружения. Поэтому нужно устранять возможность микросмещений, повышать жесткость деталей, снижать вероятность возникновения вибраций при работе машины, а также исключать непосредственный контакт металла с металлом (например, с помощью нанесения неметаллического покрытия).

При абразивной повреждаемости основным конструктивным мероприятием является защита узла от попадания абразива, то есть применение различных уплотнений, сальников и пыльников.

Для борьбы с усталостным разрушением поверхностей при качении необходимо производить тщательный расчет параметров нагружения, исключая возможность этого разрушения.

Изнашивание рабочих поверхностей может привести к изменению зазоров, появлению ударных нагрузок и переходу к недопустимым процессам повреждаемости, а износ в сопряжениях – к нарушению точности механизмов. В этих случаях необходимо предусмотреть возможность компенсации износа за счет регулирования зазора.

Выход трущихся деталей из строя может быть обусловлен также их недостаточной механической прочностью. При этом в глубинных слоях развивается неоднородная пластическая деформация, вызывающая появление смятия и объемной усталости, особенно в биметаллических подшипниках скольжения.

Другой принципиальной задачей, решаемой с помощью конструктивных методов, является снижение интенсивности нормального изнашивания материалов и оптимизация сил трения в паре.

Выбор материалов для узлов трения машин. Выбор материалов для антифрикционных и фрикционных пар трения производят эмпирическим путем, при значительных затратах времени, материальных средств и далеко не оптимально. В течение длительного времени антифрикционность и фрикционность считались свойством материала. Было установлено также, что тонкие металлические пленки пластичных металлов (олова, свинца, кадмия, серебра и др.) на рабочих поверхностях вкладышей подшипников повышают антифрикционность. Основные показатели антифрикционности и фрикционности зависят от природы обоих материалов, составляющих пару трения, а также от сорта масла и типа применяемых присадок. Однако при заданном сочетании материалов и смазки в зависимости от нагрузочно-скоростных режимов могут быть получены как низкие значения коэффициента трения, так и высокие. Например, сочетание «оловянистая бронза – сталь» при смазке нефтяными маслами широко применяют как в антифрикционных, так и во фрикционных парах трения.

В настоящее время в узлах трения машин применяют металлические, неметаллические и композиционные материалы. Эти материалы получают методами литья, порошковой металлургии, наплавки, напыления и т. д. Узлы трения работают в широком диапазоне скоростей, нагрузок, с жидкими и твердыми смазками, при низких и высоких температурах, в среде воздуха и в агрессивных средах.

Для обоснованного выбора материалов и смазок необходимо разрабатывать общие принципы, основанные на механике, физике и химии процессов изнашивания деталей. Материалы для сопряженных деталей должны обладать конструкционной прочностью, обеспечивать структурные условия антифрикционности или фрикционности, иметь хорошую прирабатываемость.

Конструкционная прочность определяется объемными характеристиками материала, при которых в глубинных слоях деталей не развивается неоднородная пластическая деформация, являющаяся источником недопустимых явлений смятия, выкрашивания и усталостного разрушения.

В литых сплавах требования прочности могут быть удовлетворены только при наличии в структуре упрочняющей фазы. В материалах, получаемых с помощью метода порошковой металлургии, прочность достигается за счет неоднородности структуры и за счет получения оптимальной пористости. А в полимерные материалы вводят специальные наполнители. Прочность пластичных материалов (свинец, олово, кадмий, баббиты) в биметаллических подшипниках обеспечивается за счет нанесения их тонким слоем. Стальные и чугунные детали фрикционных пар упрочняют механическими, термическими и химико-термическими методами.

В целом, конструкционная прочность материалов достигается при оптимальном сочетании объемных характеристик твердости, ударной вязкости, пределов прочности, текучести и усталости.

Состояния антифрикционности и фрикционности могут быть достигнуты при особом строении поверхностных слоев. Необходимым является условие, чтобы пара трения работала в режиме структурной приспособляемости, так как только в этом случае отсутствует повреждаемость. Сопротивление повреждаемости определяется, в первую очередь, способностью материала к регенерации пленок вторичных структур. Их защитные функции состоят не только в прямом экранировании поверхностей и предотвращении патологических

процессов повреждаемости, но и в улучшении смазочного действия. При нарушении режимов смазки, локальном повышении температуры или перегрузках в зоне контакта могут произойти нарушения динамического равновесия процессов образования вторичных структур и переход к недопустимым явлениям схватывания. Для того чтобы избежать этого необходимо выбирать материалы с малой склонностью к схватыванию. Одной из распространенных причин схватывания является недопустимое повышение температуры в зоне контакта. Поэтому пары трения должны обладать большой теплопроводностью, теплоемкостью, теплостойкостью и низким коэффициентом линейного расширения.

В узлах трения, работающих в агрессивных средах, может возникнуть повреждаемость, вызванная процессами коррозии и эрозии. При работе в таких условиях материалы должны обладать коррозионной и эрозионной стойкостью.

Оптимальное устойчивое значение коэффициента трения достигается при определенном сочетании типов вторичных структур на сопряженных поверхностях. Переход от структур I типа к структурам II типа для каждого металла происходит в определенном диапазоне значений удельной работы трения. Изменяя химический состав сплавов и смазочных сред, можно смещать критические значения в сторону больших или меньших величин, то есть управлять образованием нужного типа вторичных структур.

Износостойкость при нормальных условиях трения определяется поверхностной прочностью защитных пленок вторичных структур. Интенсивность разрушения зависит от фазового состава, структуры и условий нагружения этих пленок. Прирабатываемость не является свойством материала. Интенсивность приработки зависит от режимов нагружения, наличия в смазочной среде химически- и поверхностно-активных веществ. Основное значение приработки состоит не только в устранении погрешности изготовления и сборки деталей, но и в необходимости перестройки структуры поверхностных слоев от исходного состояния к рабочему или эксплуатационному.

Для антифрикционных узлов благоприятные условия для прирабатываемости создаются, когда обе поверхности покрыты пленками структур I типа, поскольку эти структуры обладают меньшей износостойкостью. Для этого приработка должна проводиться при низких скоростях и удельных нагрузках, которые исключают возможность схватывания.

Сложность создания новых материалов состоит в необходимости выполнения всего комплекса предъявляемых требований. На практике выполнение одного из них часто приводит к нарушению другого. Например, при разработке подшипникового материала А9-2 в сплав алюминия, меди, никеля и кремния вводилось свыше 10 % олова. При этом были достигнуты высокие антифрикционные показатели. Однако олово ухудшило литейные свойства сплава. Для того чтобы избежать образования горячих трещин при отливке, пришлось уменьшить содержание кремния в сплаве ниже оптимального. Это, в свою очередь, привело к снижению прочностных свойств сплава и вызвало необходимость упрочнения заготовок подшипников пластической деформацией.

При увеличении содержания цинка в латуни повышается конструкционная прочность сплавов, однако резко снижается антифрикционность. Это объясняется тем, что цинк является элементом, расширяющим область существования вторичных структур первого типа и снижающим теплопроводность меди. Добавки к латуни элементов, расширяющих область существования вторичных структур второго типа (свинца, олова), а также применение смазок с химически активными присадками, позволяют повысить износостойкость и противозадирную стойкость узлов трения.

Однако проблема выбора не ограничивается определением материала для одной из деталей пары трения. Принципиальное значение имеет проблема совместимости материалов в узлах трения машин. Совместимыми считаются такие материалы, которые в заданном диапазоне нагрузочно-скоростных факторов обеспечивают минимальный износ и оптимальное трение в паре. Прежде

всего важно обеспечить условия нормального трения и отсутствия повреждаемости материалов. Это достигается:

- 1) выполнением требований конструкционной прочности;
- 2) выбором материалов для пар трения, несклонных к схватыванию и другим недопустимым процессам повреждаемости;
- 3) выбором типа смазки (жидкой, твердой, газообразной).

Для антифрикционных пар трения должны быть выполнены структурные условия, согласно которым поверхности трения одного из элементов (как правило, вала) должны быть покрыты пленками вторичных структур I типа, а поверхности другого (подшипника) – структурами II типа. Это достигается:

- 1) выбором материала вала, обеспечивающего минимальную структурно-термическую активацию и оптимальную пассивацию тончайших поверхностных слоев (образование вторичных структур I типа);
- 2) выбором материала подшипника, обеспечивающего максимальный уровень структурно-термической активации и пассивации поверхностей трения (образование вторичных структур II типа);
- 3) применением материала вала и подшипника, содержащих легирующие элементы, расширяющие области соответствующих типов вторичных структур;
- 4) выбором химической активности смазки, обеспечивающей заданные структурные условия.

Образование на поверхности подшипника вторичных структур второго типа необходимо для низкого коэффициента трения, высокой смачиваемости, отсутствия схватывания с валом и минимальной повреждаемости поверхностей в перерывах подачи смазки. Структуры данного типа находятся в ультрадисперсном состоянии и имеют прочность, значительно превосходящую прочность исходного металла.

В подшипниковых сплавах обязательно присутствие элементов (олово, свинец, кадмий), расширяющих область существования вторичных структур второго типа. В узлах, работающих с малыми скоростями при смазке обычными маслами, можно применять баббиты, алюминиевые сплавы и другие материалы, образующие структуры данного типа при низких значениях удельной работы трения. Латунь целесообразно применять в сочетании с маслами, легированными химически активными присадками. В узлах трения, работающих с консистентными смазками, применяют антифрикционные чугуны. В узлах трения без смазки могут работать также полимерные материалы и материалы порошковой металлургии, содержащие твердые смазки. В узлах, работающих со средними и повышенными скоростями при смазке маслами, можно применять баббиты, бронзы, алюминиевые сплавы и пористые спеченные материалы.

Для расширения области существования структур первого типа на стальных валах при работе в паре с латунями, порошковыми материалами, чугунами и полимерами необходимо снижать возможность структурной активации поверхностных слоев с помощью упрочняющей технологии.

Следует избегать сочетания материалов, образующих одноименный тип вторичных структур. Сочетание первого типа друг с другом вторичных структур характеризуется высоким коэффициентом трения и низкой стойкостью граничных смазочных слоев. Однако такое сочетание выгодно в слаботочных скользящих электрических контактах. В этом случае прочность пленок вторичных структур первого типа оказывается достаточной, чтобы предотвратить схватывание и в тоже время обеспечить надежный электрический контакт.

Одновременно с выбором материалов следует определить тип и состав смазки. Химическая активность смазки должна обеспечивать структурные условия антифрикционности. Излишняя химическая активность может привести к образованию структур второго типа на обеих поверхностях или к проявлениям коррозионного разрушения.

Для фрикционных пар трения необходимо выполнение условий, согласно которым поверхности обоих элементов пары трения должны быть покрыты пленками вторичных структур второго типа. Это может быть достигнуто:

- 1) выбором материалов, обеспечивающих максимальную степень пассивации поверхностей трения (образование вторичных структур второго типа);
- 2) применением материалов, содержащих элементы, расширяющие области существования вторичных структур второго типа;
- 3) выбором химической активности среды, обеспечивающей заданные структурные условия.

Для работы фрикционных пар трения характерно значительное повышение температуры поверхностных слоев трущихся элементов. Структурные условия фрикционности предусматривают наличие пленок вторичных структур второго типа на обеих сопряженных поверхностях. Такое сочетание обеспечивает высокие стабильные коэффициенты трения и высокую износостойкость. Применяемые для этих целей материалы обычно содержат элементы, расширяющие область структур второго типа (олово, свинец, висмут, кадмий, медь, сурьму и др.).

В узлах трения с большим теплообразованием сильно активизирован процесс окисления. Образующиеся пленки вторичных структур предельно насыщены кислородом, имеют большую толщину, обладают малой прочностью и плохо связаны с основным материалом. В этом случае большую износостойкость имеют вторичные структуры неокислородного происхождения. К теплоустойчивости, теплоемкости и теплопроводности материалов для энергонагруженных фрикционных механизмов предъявляются повышенные требования. Высокие температуры, развивающиеся на поверхностях трения, вызывают нежелательные процессы размягчения, оплавления, вторичной закалки и отпуска, обезуглероживания и коробления. Эти процессы приводят к снижению поверхностной прочности и уменьшению стабильности коэффициента трения.

Коэффициент трения не является величиной постоянной и может изменяться при нормальном трении более чем на порядок только в зависимости от сочетания вторичных структур на сопряженных поверхностях трения. Неопределенность при выборе расчетных значений коэффициентов трения приводит к разработке узлов трения либо с завышенными, либо с неоправданно заниженными показателями.

Материалы для антифрикционных пар трения. Для изготовления подшипников скольжения применяют металлические материалы, полученные при помощи методов порошковой металлургии, а также материалы, полученные на основе пластических масс. Наибольшее распространение получили баббиты, бронзы, латуни, чугуны, цинковые и алюминиевые сплавы.

Подшипники из баббитов применяют только в биметаллическом исполнении при заливке баббита на стальной вкладыш. По антифрикционным показателям баббиты превосходят все известные сплавы для подшипников, но имеют низкую усталостную прочность и теплостойкость. Для повышения усталостной прочности стремятся получить структуру с большей однородностью и наносят баббиты возможно более тонким слоем.

Высокими антифрикционными показателями обладают оловянистые бронзы. В зависимости от химического состава и структуры они могут быть литейными или обработанными давлением. Широкое применение получили также свинцовистые бронзы.

Латуни бывают двойные и многокомпонентные, содержащие, кроме меди и цинка, алюминий, железо, марганец, олово, кремний или свинец. Они по своим антифрикционным показателям значительно уступают бронзам. Это связано с тем, что цинк в медных сплавах резко расширяет область существования вторичных структур первого типа.

Алюминиевые сплавы, благодаря высоким антифрикционным показателям и усталостной прочности, находят большое применение в качестве заменителей дорогостоящих бронз и латуней. Их применяют как в биметаллическом, так и в монометаллическом исполнении. Подшипники в виде литых монометаллических втулок изготавливают из сплавов, обладающих повышенной конструкционной прочностью.

Широкое применение в изготовлении подшипников получили как серые нелегированные чугуны, так и специальные.

Материалы на основе пластических масс применяют в узлах трения, работающих без смазки или со смазкой маслами, водой и химическими агрессивными жидкостями. Обычно применяются пластмассы на основе модифицированных смол и их композиций, с различными наполнителями. В качестве наполнителей для антифрикционных пластмасс применяют органические материалы (древесную муку, шпон, хлопчатобумажные ткани), неорганические наполнители (графит, тальк, дисульфид молибдена, синтетические волокна, асбест) и металлы (медь, цинк, латунь, алюминий и др.). Пластмассы имеют следующие преимущества перед металлами: износостойкость, особенно при работе без смазки и в агрессивных средах; высокое отношение прочности к удельной массе; способность к гашению вибрации; высокая сопротивляемость схватыванию с металлом; технологичность изготовления и низкая стоимость. К недостаткам относят низкую теплопроводность, гигроскопичность, большой коэффициент линейного расширения.

В узлах трения, работающих со смазкой, применяют материалы с контролируемой пористостью. Заполнение пор маслом и его последующее выделение в процессе трения обуславливают эффект самосмазывания и возможность работы с ограниченной подачей масла. Пористые материалы делаются методами порошковой металлургии на основе железа с добавками графита или меди. Для

легких режимов работы железуграфитовые материалы являются заменителями литых подшипниковых материалов, содержащих дефицитные цветные металлы. Повышение износостойкости железуграфитовых материалов достигается введением легирующих добавок, расширяющих область существования вторичных структур второго типа. Но возможности применения существующих железуграфитовых и бронзуграфитовых материалов в узлах трения без смазки ограничены.

Материалы для фрикционных пар трения. Во фрикционных узлах один из элементов пары трения, как правило, изготавливают из стали или чугуна. При работе в легких условиях применяются углеродистые стали (35Л, 55Л) и серые чугуны (СЧ 15-32, СЧ 32-52). При тяжелых режимах трения – высокоуглеродистые пружинно-рессорные стали (80, 60Г), легированные стали (40Х, 40ХНМА, 45ХНМФА), специальные чугуны (4НМХ) и хромистые бронзы (БрХ098). Другой элемент пары может быть изготовлен как из обычных, так и из специальных (фрикционных) металлических и неметаллических материалов. Эти материалы в зависимости от их природы можно разделить на органические, асбестовые, металлические и композиционные.

Асбестовые материалы различаются между собой связкой и наполнителями. Кроме асбеста, в качестве наполнителей применяют металлы в виде стружки или порошка (латунь, медь, алюминий, свинец), графит, окислы и соли металлов. Материалы на основе асбеста отличаются высоким коэффициентом трения и хорошей прирабатываемостью.

Металлические материалы применяют в узлах трения, работающих как со смазкой, так и без нее. В дисковых тормозах и фрикционных муфтах часто применяют пары трения из термически обработанных сталей марок 45, 60Г и других. Недостатком сталей является их повышенная склонность к схватыванию и короблению. Диапазон структурной приспособляемости, а значит,

надежность и долговечность работы фрикционных пар могут быть расширены за счет сульфоцианирования деталей.

Перспективным материалом для деталей фрикционных пар трения является графитизированная сталь. Наличие в структуре свободного графита уменьшает склонность к схватыванию и, таким образом, расширяет диапазон нормальной работы пары трения.

Спеченные материалы для фрикционных пар трения изготавливают на медной и железной основах. Эти материалы обычно содержат добавки свинца, олова, цинка и других металлов, а также неметаллов: графита, окислов алюминия, молибдена, хрома, карбидов титана, вольфрама и кремния. Спеченные материалы на железной основе обладают большей теплостойкостью и их можно применять в узлах трения без смазки при температуре до 1 100 °С. Типичным представителем является материал ФМК-11 (14–16 % меди, 6,5–8 % графита, 2,5–3 % окиси кремния, 4–6 % барита, 2,5–3,5 % асбеста).

Материалы, стойкие к абразивному воздействию. Для деталей машин, работающих в условиях сред с повышенной абразивностью, основным требованием является высокая износостойкость. Задача при выборе материала для конкретного узла состоит в том, чтобы локализовать проявления патологических процессов повреждаемости (микрорезание, микроударное разрушение) и стимулировать протекание процесса в допустимой механохимической форме. Это может быть достигнуто несколькими способами:

1) применением материалов повышенной твердости – сталей карбидного класса или упрочненных методами термической или химико-термической обработки; металлокерамических сплавов (ВК3, ВК6, Т5К10); специальных чугунов, легированных хромом, марганцем, молибденом, вольфрамом, никелем; абразивных композиций (карборунд, электрокорунд); каменного литья (базальт, диабаз, габбразиобод), а также эмалированием деталей;

2) применением сталей и чугунов с аустенитно-карбидной структурой, в которых аустенит не стабилен и способен к мартенситному превращению в процессе трения;

3) применением материалов и покрытий, способных за счет упругого деформирования поглощать большую часть кинетической энергии абразивных частиц (резина, пластмассы).

Чем выше твердость материала, тем ниже его ударная вязкость. Поэтому возможность использования материалов с повышенной твердостью ограничивается условиями работы детали. Применение хрупких материалов для деталей, работающих при динамических нагрузках, вызывает их объемное разрушение.

Структура большинства износостойких сплавов на основе железа состоит из ферритной, аустенитной, мартенситной матрицы и твердых включений в виде карбидов. Применение сталей и чугунов, имеющих структуру нестабильного аустенита с включениями карбидов, позволяет обеспечить оптимальное сочетание объемной прочности и пластичности при высокой износостойкости. При интенсивном абразивном воздействии в поверхностных слоях деталей происходит распад аустенита с образованием мартенсита.

Для защиты рабочих органов почвообрабатывающих машин применяют сплавы типа сормайт или сплавы с высоким содержанием карбидной фазы. Упрочняющая фаза в наплавочных сплавах содержит карбиды: Fe_3C ; Mn_3C ; Cr_7C_3 ; W_2C ; WC ; VC ; TiC ; B_4C ; Mo_2C , а также нитриды, железо и легирующие элементы. Таким сплавом является релит. Также для защиты лемехов и культиваторов, смесителей абразивных материалов; шнеков транспортеров цементной промышленности; размольного оборудования, дробилок, ковшей погрузочных машин и деталей бурового оборудования может использоваться самонаплавленный прут с Ni-Cr-B-Si сердечником, выполненным в форме проволоки с оболочкой из смеси карбидов вольфрама и никелевого порошка.

Литой карбид вольфрама (сплав WC–W₂C) является особо прочным, устойчивым к износу материалом. Он предназначен для защиты поверхностей, подверженных абразивному и эрозионному износу, в условиях высокого давления и ударов, в том числе при температуре до 6 000 °С. Методом его нанесения выступает твердая пайка.

В грунтовых насосах при работе на мелких песчаных грунтах, размер зерен которых не превышает 5 мм, существенное повышение износостойкости деталей (в 10 раз и более) может быть достигнуто при помощи гуммирования. Детали покрывают слоем резины на основе каучука. Но при крупных размерах абразивных частиц (более 5 мм) и высокой скорости потока резина оказывается неработоспособной.

Материалы, стойкие к гидроэрозии. К материалам, работающим в среде быстротекущей жидкости, предъявляются требования высокой конструкционной прочности, а также коррозионной и эрозионной стойкости. При работе деталей машин без кавитации ведущим процессом является механохимический. В этом случае разрушение происходит в результате периодического образования и разрушения пленок вторичных структур. При работе в режиме кавитации может возникнуть недопустимое глубинное разрушение материала в результате микроударного воздействия.

В этой связи выбирать кавитационностойкие сплавы необходимо так, чтобы длительность инкубационного периода развития повреждений была как можно больше. Феррит, аустенит, мартенсит в условиях микроударного воздействия имеют различную склонность к упрочнению, которая обуславливает их сопротивление деформации и разрушению при микроударном воздействии. Феррит слабо сопротивляется кавитационному разрушению, поэтому ферритные стали не являются кавитационностойкими. Детали, работающие в условиях кавитации, могут быть изготовлены из углеродистых сталей. Наибольшее

сопротивление внешнему нагружению оказывает аустенит, который под влиянием внешней нагрузки претерпевает фазовые превращения.

Повышенная стойкость таких сталей обусловлена двумя причинами: деформационным упрочнением поверхностных микрообъемов в результате распада нестабильного аустенита; и образованием мартенсита, которое сопровождается проявлением пластичности в момент фазового перехода, что приводит к релаксации напряжений. Мартенсит, образующийся при деформации нестабильных аустенитных сталей, имеет ряд преимуществ по сравнению с мартенситом, полученным при закалке. Он обладает повышенной дисперсностью и твердостью, меньшим размером субзерен, что определяет его большую эрозионную стойкость при микроударном воздействии.

Материалы, работающие при гидроэрозии, подвергаются также коррозионному воздействию рабочей среды. При этом необходимо учитывать, что не может быть одной марки стали или сплава, пригодной для всего многообразия условий эксплуатации деталей. Поэтому в каждом отдельном случае выбор материала должен базироваться на глубоком изучении условий, в которых происходит его разрушение.

В условиях, когда ведущим процессом разрушения является механохимический, возможно применение нержавеющей сталей мартенситного и мартенсито-ферритного класса.

Детали, предназначенные для работы в условиях интенсивного микроударного воздействия должны быть изготовлены из сталей, имеющих мартенситную структуру. Соблюдение структурного принципа в сочетании с требованиями объемной прочности и технологичности возможно при применении метода поверхностной закалки ТВЧ; получении нестабильных твердых растворов типа аустенита на хромомарганцевой основе, способных упрочняться в процессе эксплуатации за счет образования мартенсита; получении безуглеродистого мартенсита с последующим старением его при отпуске.

В двигателях внутреннего сгорания одной из причин кавитационных разрушений гильз и блоков цилиндров являются колебания гильз, возбуждаемые циклической нагрузкой, действующей на поршни. Для защиты гильз двигателей ЯМЗ от кавитационного разрушения применяется способ постановки резиновых антикавитационных колец в нижнем посадочном поясе. При этом плоское резиновое кольцо с натягом надевается на гильзу, а затем гильза с кольцом устанавливается на блок. Наличие резинового кольца снижает интенсивность этих колебаний.

Конструкционные методы борьбы с коррозионным разрушением деталей машин. Правильный выбор методов защиты деталей, работающих в агрессивных средах, позволяет исключить коррозионное разрушение, либо перевести его в менее разрушительные формы. *Методы защиты от коррозии можно разделить на следующие группы:*

- 1. Оптимальное конструирование деталей и узлов, работающих в агрессивных средах.*
- 2. Рациональный выбор материалов, стойких против коррозии.*
- 3. Изоляция материала от прямого воздействия среды за счет применения разнообразных защитных покрытий.*
- 4. Обработка среды с целью уменьшения ее агрессивности.*
- 5. Использование методов электрохимической защиты.*

При разработке конструкции деталей и узлов необходимо, в первую очередь, предусмотреть мероприятия, устраняющие возможность возникновения наиболее разрушительных местных видов коррозии. В конструкциях трудно избежать соединения электрохимически разнородных металлов, при взаимодействии которых со средой может возникнуть контактная коррозия. В этом случае рекомендуется изолировать металлы друг от друга пластмассами, резиной или герметиками.

При применении клепаных конструкций нельзя допускать, чтобы заклепки имели более отрицательный потенциал по сравнению с листовым материалом. В этом случае наиболее ответственная часть конструкции начинает сильно разрушаться. Выбирать металл для заклепок необходимо так, чтобы он не слишком сильно усиливал коррозию листового материала. Категорически не рекомендуется совмещать сталь с алюминием. Наиболее устойчивой к коррозии является заклепка из нержавеющей стали. Следующим по степени надежности идет алюминий и на последнем месте сталь.

Для защиты деталей от щелевой коррозии нужно располагать элементы конструкции так, чтобы не образовывались щели, зазоры и застойные места. При разработке конструкций, работающих в атмосферных условиях, а также химической аппаратуры необходимо обеспечить слитность сечения, обтекаемость элементов, возможность легкой разборки для периодической очистки и отсутствие концентрации напряжений.

При выборе коррозионностойких материалов необходимо помнить, что нет универсальных материалов. Физические механизмы повышения коррозионной стойкости сплавов различны. Основным методом защиты металлов является легирование. Скорость коррозионного разрушения зависит от механических, физических и химических свойств окисной пленки, образующейся на поверхности сплава. Поэтому выбор можно считать рациональным, если сплав полностью соответствует нагрузочным и физико-химическим условиям среды.

Наибольшее распространение получили высоколегированные коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные стали. По химическому составу эти стали делятся на хромистые, хромоникелевые, хромоникелевомарганцевые. Кроме основных легирующих элементов (хром, никель, марганец), они могут быть дополнительно легированы азотом, ниобием, вольфрамом, медью, селеном, молибденом, бором, кремнием, титаном, ванадием, алюминием, кобальтом.

Высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах обладают сплавы на железоникелевой и никелевой основах. Никелевые сплавы содержат медь, хром, титан, алюминий, барий, церий, молибден и вольфрам. Эти сплавы в основном используются в качестве жаростойких для дисков лопаток турбин, жаровых труб, крепежных и других деталей, работающих длительно при температуре до 1 000 °С.

Сплавы титана, наряду с высокими прочностными показателями, обладают хорошей коррозионной стойкостью. Они применяются в химическом, пищевом и другом оборудовании.

10.3 Обеспечение надежности при изготовлении машин. Роль технологии

Достижения высокого качества деталей конструкторы добиваются в сотрудничестве с технологами путем выполнения определенных технологических мероприятий, которые повышают точность изготовления и улучшают свойства материалов.

Технологические методы повышения надежности заключаются в обеспечении оптимальной шероховатости, точности изготовления деталей и упрочнении поверхностей трения.

В настоящее время существуют различные способы упрочнения поверхностей деталей. Они направлены на создание необходимых физико-механических свойств, а также макро- и микрогеометрии поверхностей трения. Их можно разделить на следующие группы:

1) *способы холодного пластического деформирования поверхностей* (дробеструйный наклеп, обкатка роликами или шариками, дорнование);

2) *способы термической и химико-термической обработки* (нормализация, закалка, цементация, азотирование, цианирование);

3) способы легирования поверхностей трения (хромирование, никелирование, остаивание и т. д.);

4) способы плакирования поверхностей трения приклеиванием и напылением композитов; плазменной, термодиффузионной, вибродуговой и автоматической наплавками или электролитическими покрытиями.

Обеспечение точности изготовления деталей зависит от используемого оборудования. С повышением точности уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и более жестко регламентируются натяги в неподвижных, что значительно повышает долговечность машин. В зависимости от условий эксплуатации в трущихся парах образуется определенная шероховатость, которую необходимо соблюдать и при производстве техники. Эта оптимальная шероховатость должна задаваться и для поверхностей деталей с неподвижными посадками. Следует учитывать, что чем меньше шероховатость, тем больше сопротивляемость поверхностей к коррозии. Также шероховатость поверхности оказывает влияние на сопротивляемость усталости. Кроме того, имеет влияние направление следов обработки: если они совпадают с действием главного напряжения, предел усталости будет выше.

Достижение высокого качества поверхности возможно при использовании следующих методов и оснастки:

1) срезание неровностей поверхности путем тонкого шлифования, хонингования, суперфиниширования и полирования, особенно с применением синтетических алмазов (паст, брусков, лент);

2) смятие поверхностей за счет поверхностного пластического деформирования: обкатывания, раскатывания, дорнования, алмазного выглаживания и виброобкатывания алмазными или твердосплавными наконечниками;

3) создание нового микропрофиля поверхности путем электрохимической или электромеханической обработки.

Макрогеометрические отклонения формы также оказывают влияние на равномерность зазора или натяга в сопряжении и на условия смазки, и таким образом определяют эксплуатационную надежность узлов.

За критерий оценки качества поверхности принимают следующие, нерегламентированные государственным стандартом параметры: величины опорной поверхности; поверхность фактического контакта; радиусы закругления вершин и впадин микронеровностей; углы наклона неровностей при основании; отношение радиуса закругления вершин микронеровностей к их максимальной высоте; среднее квадратическое отклонение высот микронеровностей.

В процессе эксплуатации машин изнашиваются в основном поверхностные слои деталей. Если сравнить вес нового автомобиля грузоподъемностью 4 тонны с весом такого же, но уже полностью изношенного, разница составит всего 1,5–2 килограмма. Это и есть суммарный вес изношенных слоев деталей. Роликовый подшипник весом 12 кг теряет 20–30 граммов. А раз изнашиваются только верхние слои, то их и нужно упрочнять, чтобы создать деталям своего рода «броневую защиту».

Применение новейших методов упрочнения позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики деталей. В настоящее время существует множество методов упрочнения: термическое и термохимическое упрочнение, наклеп, наплавка, диффузионная металлизация, хромирование, оставление и т. д. Например, наплавка боковых граней ножей вторичного резания измельчителя «Волгарь-5А» удорожает стоимость изготовления и не снижает энергоемкость резания кормов, но повышает ресурс ножей в 2–3 раза, что приносит прибыль потребителю изделия.

Успешно применяются индукционная наплавка твердыми сплавами рабочих органов сельскохозяйственных машин (лемехов, лап культиваторов); срок службы при этом повышается в 2–3 раза. Плазменная наплавка тарелок клапанов ГРМ увеличивает срок их службы от 4 до 10 раз. Торцы стержней клапанов

и толкателей, а также клапанные гнезда упрочняют наплавкой твердыми сплавами, легированными сталями и специальными чугунами.

Большинство металлов, несмотря на механическую прочность, сравнительно легко разрушаются под влиянием внешней среды – воздуха, воды, растворов кислот, щелочей и солей. Процессы коррозии очень разнообразны и широко распространены среди сельскохозяйственных машин. Коррозия приносит большой вред. Потери от коррозии составляют до 30 % от всего веса металла изделий. Для изготовления особо ответственных деталей, работающих в агрессивной среде, используют специальные противокоррозионные стали. Для повышения коррозионной стойкости деталей используют методы нанесения на поверхность лакокрасочных, эмалевых и пластмассовых покрытий. Весьма эффективным является нанесение износостойких и коррозионно-стойких гальванических покрытий. Например, пористое хромирование успешно используется для упрочнения верхних поршневых колец, которые хорошо работают в паре с чугунными гильзами. Срок службы в результате этого повышается в 1,5–2 раза. Если хромирование использовать для упрочнения рабочих поверхностей гильз цилиндров и шеек коленчатых валов, то стоимость двигателя повышается на 4 %, а ресурс – в 2–3 раза.

Многие автотракторные детали (вилки, кольца, крепежные детали и др.) подвергаются нанесению коррозионно-стойких электролитических и химических покрытий: цинкованию, никелированию, оксидированию, фосфатированию, лужению и др., а также применению комбинированных процессов: цинкованию с хромированием, кадмированию с хромированием и др. Чтобы повысить коррозионную стойкость цинковых покрытий в 5–7 раз, их подвергают дополнительной обработке хромированием – погружением в раствор хромовой кислоты или ее солей на несколько секунд.

Большое влияние на надежность деталей и агрегатов оказывает также их статическая и динамическая балансировка. Увеличение дисбаланса вызывает резкое повышение износа.

Надежным должен быть также сам технологический процесс изготовления детали или полнокомплектной машины. Для этого необходимо не допускать отклонений в технологии, которые могли бы отрицательно сказаться на надежности выпускаемых изделий. Как правило, большой процент отказов машин связан с недостаточной надежностью технологического процесса изготовления деталей и агрегатов. При этом технологические дефекты являются не только ошибкой производителей, но и следствием низкого уровня организации технологического процесса, при котором не контролируются параметры изделия, влияющие на его надежность.

Например, имеет место выпуск недокаленных подшипников и пружин. Поэтому необходимо вести строгий контроль за техническими операциями и качеством работы технологического оборудования, а в производственных помещениях обеспечивать чистоту и комфорт.

Таким образом, на надежность выпускаемых изделий оказывают влияние все технологические процессы и их режимы, начиная от металлургических процессов получения исходных материалов и заканчивая сборкой машин, а также их обкаткой.

10.4 Обеспечение надежности при ремонте

Ремонт машин является важным звеном в системе поддержания работоспособности. При ремонте можно проводить модернизацию и мероприятия по повышению долговечности. Основные пути решения этих задач следующие:

1. Обеспечение сохраняемости ремонтного фонда. Достигается организацией складов и площадок, применением подставок, антикоррозионных смазок и других средств. Особое внимание следует уделять защите от коррозии деталей, поступающих для восстановления, которые при неудовлетворительном хранении могут быть превращены в металлолом.

2. Исключение повреждения деталей и разукomплектовки пар при выполнении разборочных работ. При разборочных работах рекомендуется использовать приспособления, исключающие повреждения деталей, а также различные контейнеры для сохранения комплектов деталей. Запрещается разукomплектовывать блоки цилиндров, крышки подшипников коленчатого вала, шатуны и их крышки, пары шестерен главной и конечных передач.

3. Внедрение на ремонтных предприятиях эффективной очистки деталей. Это одно из важнейших условий обеспечения высокого послеремонтного ресурса машин. Удаление нагара, смолистых отложений, накали и других загрязнений – специфический процесс, имеющий определенные трудности и требующий большого внимания, а также использования современных моечных машин и препаратов, содержащих поверхностно-активные компоненты и обеспечивающих заданные режимы мойки, особенно поддержание температуры (в пределах от 75 до 90 °C).

4. Контроль и дефектация изношенных деталей. Эти операции в значительной мере определяют сроки службы машин. Принимая во внимание высокую точность изготовления автотракторных деталей и жесткие технические условия на ремонт, на предприятиях следует расширить номенклатуру деталей, подвергаемых сплошному контролю. При этом рекомендуется применение измерительных инструментов, обеспечивающих точность измерений до 0,001–0,010 мм. Такие детали машин, как коленчатые валы, шатуны, поворотные цапфы, блоки и гильзы цилиндров должны быть обязательно проверены

на отсутствие скрытых дефектов (особенно трещин) методами магнитной, люминесцентной, ультразвуковой и рентгеновской дефектоскопии, гидравлической опрессовкой и др.

5. *Сплошной контроль размеров и геометрии рабочих поверхностей базовых деталей, а также точности их взаимного расположения.* За время эксплуатации на машинах в результате старения материала и износов, а также внутренних напряжений происходят изменения размеров, геометрии и взаимного расположения рабочих поверхностей, которые должны быть устранены.

6. *Восстановление деталей с применением прогрессивных способов нанесения покрытий и упрочнения поверхностей.* Выполнение восстановительных процессов оказывает решающее влияние на послеремонтный ресурс машины, потому что работоспособность любой машины зависит от качества деталей, устанавливаемых на нее. Качество и долговечность восстановленных деталей зависят от выбора способа восстановления и применения упрочняющей технологии. Примером этому может служить повышение долговечности хромированных поршневых колец, наплавленных клапанов и рабочих органов сельскохозяйственных машин.

7. *Внедрение на ремонтных предприятиях входного контроля приобретаемых деталей.* Это необходимо в связи с тем, что у новых деталей могут встречаться значительные отклонения параметров от номинала.

8. *Тщательный весовой и размерный подбор деталей цилиндро-поршневой группы.* В связи с форсированием современных двигателей по оборотам и нагрузке необходим тщательный подбор по массе деталей цилиндро-поршневой группы. Особенно это важно для ремонтных предприятий, так как при замене изношенных деталей происходит разукomплектовка. Например, для двигателей СМД-4 разность в массе комплекта поршней не должна превышать 7 грамм, а шатунов – 12 грамм.

9. Динамическая балансировка коленчатых и карданных валов, маховиков, муфт сцепления, других узлов и деталей.

10. Обеспечение регламентированных посадок и усилий затяжки резьбовых соединений.

11. Обеспечение герметизации агрегатов и сборочных единиц при их ремонте. Это достигается не только заменой сальниковых уплотнений, но и устранением коробления плоскостей разъемов, а также применением специального прокладочного материала ЛАСП, прокладок из паронита и герметизирующих паст. Необходимо проверять качество сборки и герметизации агрегатов.

12. Стендовая обкатка и испытания. Это ответственный начальный период работы агрегатов и машин. Поэтому в условиях ремонтных предприятий он должен выполняться введением обкатки под нагрузкой (не только двигателей, но и агрегатов трансмиссий) с применением осерненных обкаточных масел (ОМ-2) и присадок (АЛП-2) к топливу. За период производственной обкатки тракторов рекомендуется трижды менять смазку. В процессе стендовой обкатки необходим тщательный контроль для выявления посторонних шумов и стуков; повышенного нагрева; течи масла, воды и топлива; нарушения регулировок. После обкатки проводится контрольный осмотр двигателей и агрегатов, а при необходимости повторное испытание, замена смазки и промывка агрегатов дизельным топливом, а также очистка и замена фильтрующих элементов. Особое внимание при этом обращают на герметичность и нормальную работу воздухоочистителей.

13. Повышение качества окраски ремонтируемых машин и их сопротивляемости коррозии. В условиях ремонтных предприятий это достигается следующими приемами: снятием старой окраски в горячих щелочных ваннах; применением эффективных грунтов и эмалей; отдельной окраской

агрегатов (до общей сборки машин) и машин в целом (после обкатки и испытаний) с применением новых методов окраски (в электростатическом поле и гидродинамическим распылением).

10.5 Обеспечение надежности при эксплуатации

Как правило, новая машина сдается в эксплуатацию с достаточно высоким уровнем надежности и оптимальной долговечностью. Но как бы хорошо она ни была сконструирована и изготовлена, эффективное ее использование возможно только при нормальном уходе за ней. Условия эксплуатации оказывают большое влияние на надежность машин и могут свести на нет все достижения конструкторов и технологов. Надежность машин в эксплуатации зависит от целого ряда мероприятий.

Эксплуатационные методы повышения надежности заключаются в разгрузке рабочих поверхностей; применении химически активных присадок и поверхностно-активных веществ; применении антиокислителей; использовании масел с малым модулем сдвига; соблюдении правил эксплуатации, технического обслуживания и ремонта машин.

Обкатка машин в хозяйствах обуславливает длительную и безотказную работу и должна проводиться при постепенном повышении нагрузки в соответствии с рекомендациями заводов. Она включает опробование работы двигателя без нагрузки и работу с постепенным повышением нагрузки при выполнении сельскохозяйственных и транспортных работ, не требующих больших тяговых усилий. Во время обкатки постоянно ведут контроль за работой двигателя и агрегатов с целью выявления повышенного нагрева, шумов и стуков, утечки масла. По завершении обкатки проводится плановое ТО-1 с заменой масла в двигателе и во всех агрегатах. Ограничение мощности рекомендуется снимать через 120 часов работы двигателя. На трактор, прошедший обкатку,

составляют акт, делают отметку об этом в техническом паспорте и сдают машину в эксплуатацию. Первые 50–60 часов эксплуатации после обкатки трактор должен находиться под особым наблюдением механика.

Организация технического обслуживания и создание необходимой базы для него – важное условие обеспечения надежной работы машинно-тракторного парка. Система технического обслуживания сельскохозяйственной техники предусматривает проведение ежесменных (через 8–10 часов работы), сезонных (два раза в год) и плановых технических обслуживаний. Периодичность проведения ТО машин необходимо строго соблюдать. Работа на машинах без проведения ТО запрещается.

Качество технических обслуживаний зависит от средств и места их проведения, а также квалификации обслуживающего персонала. Высокой эффективности добились хозяйства, в которых организованы стационарные пункты ТО. Хозяйства, не имеющие необходимой технической базы, принимаются на комплексное ТО предприятиями технического сервиса, на которых также проводятся периодические ТО автомобилей и оборудования ферм.

Кроме этого, также надлежит:

1. Применять тщательно разработанные и обоснованные методики по эксплуатации, профилактике и ремонту машин.
2. Допускать только квалифицированный персонал, подготовленный к обслуживанию машины данной марки.
3. Правильно устанавливать права, обязанности и ответственность обслуживающего персонала.
4. Организовать на объектах сбор полных и достоверных статистических данных об отказах и простоях машин.
5. Периодически проводить анализ данных и разрабатывать рекомендации по улучшению эксплуатации, совершенствованию конструкции, технологии изготовления и ремонта машин.

Систематическое и строгое проведение этих мероприятий позволяет добиться существенного увеличения надежности и долговечности машин.

Проведение технических осмотров и диагностирования – составная часть общей системы технического обслуживания машин. Их проводят по одному – два раза в год представители государственных надзорных органов с целью контроля за качеством эксплуатации и хранения.

Обеспечение нормального режима работы машин, особенно в зимнее время, повышает их долговечность. Перегрузка машин (по нагрузке и скорости), неправильные регулировки зазоров в подшипниках, шестернях и других соединениях вызывают нарушения температурного режима работы трущихся деталей и условий смазывания, что приводит к их форсированному износу.

Наиболее высокие нагрузки на детали и плохие условия смазывания наблюдаются при запуске двигателя и включении трансмиссий при температуре ниже 5 °С. Несколько минут такой работы вызывают износы, которые могли бы появиться за десятки и даже сотни часов нормальной эксплуатации. Чтобы обеспечить нормальный тепловой режим работы двигателей в зимнее время проводят следующие мероприятия:

- 1) организуют теплые стоянки;
- 2) используют электрические подогреватели масла;
- 3) применяют системы воздушного подогрева машин, хранящихся на открытых площадках, с помощью теплогенераторов;
- 4) подают подогретую воду к машинам;
- 5) используют антифризы.

В жаркие месяцы на работу машин отрицательно влияет перегрев двигателей, который наблюдается при образовании накипи в системе охлаждения, перегрузках и неправильных регулировках. Перегрев вызывает форсированный износ цилиндрико-поршневой группы, газораспределительного и кривошипно-шатунного механизма, а в ряде случаев может привести к аварийным

дефектам (трещинам в головках и блоках цилиндров). Заводы-изготовители запрещают при перегреве масла останавливать двигатель, пока температура не понизится до нормальной.

Соблюдение установленных правил хранения машин. Основные мероприятия, обеспечивающие сохранность техники, включают:

- 1) создание специальных помещений и площадок с твердым покрытием;
- 2) использование подставок и подкладок;
- 3) очистка деталей от технологических загрязнений и почвы;
- 4) нанесение на неокрашиваемые и рабочие поверхности защитных смазок (НГ-203, НГ-204, ЦИАТИМ-202 и др.);
- 5) своевременное восстановление нарушенных лакокрасочных покрытий;
- 6) хранение в закрытых помещениях электрооборудования, резины, приборов и рабочих органов машин.

Строгое соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей по применению топлива и смазочных материалов.

Контроль и постоянное соблюдение требуемой герметизации агрегатов и систем машин для исключения попадания в них абразива. Для сельскохозяйственной техники это важный фактор повышения долговечности. Герметичность обычно нарушается из-за ослабления креплений крышек под действием вибраций, а также старения прокладочного материала и коробления корпусных деталей.

В процессе эксплуатации машин внутри их агрегатов температура повышается до 70–90 °С. В результате температурного перепада из окружающей атмосферы во внутренние полости агрегатов засасывается воздух, содержащий абразивные частицы (особенно на таких работах, как культивация и боронование). Поэтому герметизации агрегатов следует уделять особое внимание.

При эксплуатации машин в условиях повышенной запыленности воздуха рекомендуется промывать воздухоочистители через 25–30 часов, а центрифуги – через 120 часов работы.

И, наконец, большое значение для эксплуатационной надежности также имеет систематический контроль за износом сопряженных деталей с помощью средств технической диагностики.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют стадии обеспечения надежности машины?
2. Как обеспечивается надежность машин при проектировании?
3. Какие существуют технологические приемы для повышения надежности машин?
4. Как обеспечивается надежность машин при ремонте?
5. Как обеспечивается надежность машин при эксплуатации?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27674–88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 19 с.
2. ГОСТ 30479–97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования. – М. : Издательство стандартов, 1998. – 11 с.
3. ГОСТ 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 35 с.
4. Зубрилина, Е. М. Основы надежности машин / Е. М. Зубрилина, Ю. И. Жевора, А. Т. Лебедев. – Ставрополь : Агрус, 2010. – 120 с.
5. Масленко, А. Ф. Курс лекций по теории надежности / А. Ф. Масленко. – Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2001. – 200 с.
6. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем : учебник / В. Ю. Шишмарев. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
7. Штриплинг, Л. О. Надежность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Л. О. Штриплинг. – Омск : Омский государственный технический университет, 2008. – 108 с.

Учебное издание

Петроченко Виталий Владимирович, кандидат технических наук, доцент

Кузнецов Евгений Евгеньевич, доктор технических наук, доцент

Якименко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент

Кислов Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Подписано в печать 13.03.2024 г.

Формат 60×90/16. Уч.-изд. л – 7,35. Усл. печ. л. – 11,33.

Тираж по требованию. Заказ 73.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии
Дальневосточного государственного
аграрного университета
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

