

Ю.В. Баженов



ОСНОВЫ

теории

надежности

машин



Ю.В. Баженов

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

*Допущено УМО вузов РФ по образованию в области
транспортных машин и транспортно-технологических комплексов
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся
по специальностям «Автомобили и автомобильное хозяйство»,
«Сервис транспортных и технологических машин
и оборудования (по отраслям)» направления подготовки
дипломированных специалистов
«Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования»
и бакалавров и магистров по направлению подготовки
«Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»*



МОСКВА

2014

УДК 629.33

ББК 39.33

Б16

Рецензенты:

В.И. Сарбаев — доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных средств»
Московского государственного индустриального университета;

В.А. Максимов — доктор технических наук,
профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и сервиса»
Московского автомобильно-дорожного института (ГТУ)

Баженов Ю.В.

Б16 Основы теории надежности машин : учебное пособие / Ю.В. Баженов. — М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2014. — 320 с. — (Высшее образование).

ISBN 978-5-91134-883-0 (ФОРУМ)

ISBN 978-5-16-009792-3 (ИНФРА-М)

В учебном пособии рассматриваются основные понятия и определения теории надежности; причины нарушения работоспособности машин и закономерности изменения их технического состояния; факторы, определяющие интенсивность изнашивания; методы получения и анализа информации об отказах и неисправностях; обработка и анализ информации о надежности; обеспечение надежности машин на этапах проектирования, производства и эксплуатации.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям 190601.65 «Автомобили и автомобильное хозяйство», 190603.65 «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (по отраслям)» направления подготовки дипломированных специалистов 190600.65 «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования» и по направлению подготовки бакалавров и магистров 190600.62; 68 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Соответствует требованиям государственных образовательных стандартов указанных специальностей и направлений.

УДК 629.33

ББК 39.33

ISBN 978-5-91134-883-0 (ФОРУМ)

ISBN 978-5-16-009792-3 (ИНФРА-М)

© Баженов Ю.В., 2014

© Издательство «ФОРУМ», 2014

Введение

Повышение надежности машин всегда являлось одной из важнейших задач машиностроения. Актуальна эта задача и для отечественного автостроения, которое должно обеспечивать транспортный комплекс страны надежно работающим подвижным составом.

Проблема обеспечения высокого уровня потребительских свойств автотранспортной техники, ее долговечности, безотказности и ремонтнопригодности непрерывно обостряется, в связи с чем именно надежность определяет перспективы развития отечественного машиностроения в условиях острой конкуренции как внутри страны, так и со стороны зарубежных производителей автомобилей.

Приоритетное значение надежности машин при их проектировании и изготовлении подтверждается статистическими данными, свидетельствующими о том, что расходы на поддержание их в работоспособном состоянии непрерывно растут. Суммарные ежегодные потери народного хозяйства, связанные с обслуживанием и ремонтом технических средств за период эксплуатации, в несколько раз превышают их первоначальную стоимость. Недостаточный уровень надежности машин существенно снижает их производительность из-за простоев в ремонте.

Характерны следующие направления развития: повышение скорости и интенсивности их движения, грузоподъемности и вместимости, динамичности, мощности, топливной экономичности, безопасности движения и т. д. Усложнение автомобилей и ужесточение требований к ним привели к тому, что проблема повышения их эксплуатационной надежности приобрела огромное значение. ненадежный автомобиль не сможет эффективно функционировать, так как каждый его отказ влечет за собой значительные материальные потери, а в отдельных случаях может иметь и катастрофические последствия.

Анализ характера и причин отказов базируется на глубоких знаниях физической природы их возникновения и развития, т. е. знаний инженерно-физических основ надежности. Процессы, приводящие к потере машиной работоспособного состояния, включают изнашива-

ние, усталостное разрушение конструкционных материалов, пластические деформации, коррозию, старение.

При эксплуатации автомобиля подавляющее большинство деталей достигает предельного состояния из-за износа. В связи с этим выявление физических процессов изнашивания, установление зависимостей физико-механических свойств поверхностного слоя детали от режима ее работы, действия факторов внешней среды позволяют управлять этим процессом, снижать его интенсивность.

Решение проблемы повышения надежности автотранспортных средств требует, прежде всего, наличия достоверной, систематической информации по их отказам и неисправностям, фактическим ресурсам, расходам запасных частей, трудоемкостям обслуживания и ремонта, а также факторам, влияющим на эти показатели в реальных условиях эксплуатации. Обработка и анализ такой информации позволяют оценить уровень фактической надежности той или иной модели автомобиля, агрегата, узла, детали, выявить слабые места в конструкции, разработать конкретные мероприятия по повышению эксплуатационной надежности и оптимизации системы поддержания автотранспортных средств в работоспособном состоянии.

Обработка информации о надежности осуществляется методами математической статистики по показателям, оценивающим как отдельные свойства надежности (безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость), так и комплексными показателями, оценивающими несколько ее свойств одновременно.

Обеспечение необходимого уровня надежности является одной из основных задач технической эксплуатации автомобилей и важной составляющей общей системы обеспечения надежности. На фактические показатели надежности в этот период оказывает влияние множество факторов (условия эксплуатации, организация технического обслуживания и ремонта, квалификация персонала, производственно-техническая база предприятия). Управление этими факторами позволяет существенно повысить долговечность и безотказность автомобилей и их агрегатов.

Учебное пособие написано на основе курсов лекций по дисциплинам СД.03 «Основы теории надежности и диагностика» ФГОС ВПО специальности, 190601.65, СД.01 «Основы работоспособности технических систем» ФГОС ВПО специальности 190603.65 и Б2.В2.4 «Основы теории надежности» для направления подготовки бакалавров 190600.62 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

1.1. Общие понятия науки о надежности

Научно-технический прогресс предъявляет все более высокие требования к надежности продукции машиностроения. Решение этой важнейшей задачи не только обеспечивает высокий уровень безотказности и долговечности машин, но и является одним из основных источников повышения эффективности их использования, экономии трудовых, материальных и энергетических ресурсов, повышения конкурентоспособности.

Особенностью проблемы надежности является ее связь со всеми этапами проектирования, изготовления и эксплуатации машины, начиная с момента, когда формируется и обосновывается идея ее создания, и заканчивая принятием решения о списании.

Надежность машины закладывается **при проектировании и расчете**. На этом этапе она зависит от обоснованности выбора структуры машины (агрегата, узла, механизма), сопротивляемости физическим процессам разрушения, используемых материалов, методов защиты от различных вредных воздействий, системы смазки, приспособленности к выполнению операций ТО и ремонта и других особенностей конструирования.

При производстве (изготовлении) машины показатели надежности, заданные при конструировании, обеспечиваются. На этом этапе она зависит от качества изготовления деталей, используемых технологий их упрочнения, методов контроля выпускаемой продукции, возможности управления технологическими процессами производства, качества сборки, выполнения в полном объеме доводочных испы-

таний изделий по параметрам надежности и других элементов процесса изготовления.

При эксплуатации машины заложенная при проектировании и производстве надежность реализуется. Такие ее свойства, как безотказность, долговечность и ремонтпригодность, проявляются только в процессе эксплуатации машины и зависят от принятой системы ТО и ремонта, условий и режимов работы, производственно-технической базы и других эксплуатационных факторов.

Таким образом, проблема надежности является комплексной, так как непосредственно связана со всеми стадиями жизненного цикла машины — конструированием, изготовлением и эксплуатацией. Поэтому для решения задач, стоящих перед нею, привлекаются различные отрасли знаний.

Наука о надежности изучает закономерности изменения показателей качества машин и на основании этого разрабатывает методы, обеспечивающие необходимый ресурс и безотказность их работы.

Вопросы, решаемые наукой о надежности, имеют свои специфические особенности:

- закономерности изменения начальных параметров машины, возникновение в ней отказов исследуются в зависимости от наработки (во времени);
- прогнозирование уровня работоспособности машины, сохранение ее выходных параметров осуществляются в зависимости от реальных условий эксплуатации.

Основная проблема надежности как раз и связана с прогнозированием поведения машины в зависимости от предполагаемых условий ее эксплуатации. При этом весьма важно оценивать (прогнозировать) параметры надежности уже на ранних стадиях создания машины (расчетах при проектировании и конструировании), так как статистическая оценка того или иного уровня надежности объектов, отработавших свой ресурс, имеют невысокую ценность.

Изменение показателей качества машины в процессе эксплуатации могут быть как абсолютными, так и относительными.

Абсолютное изменение показателей качества связано с различными физическими процессами, действующими на машину и ухудшающими свойства и состояние материалов, из которых она изготовлена (физическое старение).

Относительное изменение показателей качества машин связано с появлением новых, более совершенных машин, характеристики кото-

рых превосходят существующие, хотя в абсолютных значениях они могут не и измениться (моральный износ).

Наука о надежности изучает изменение показателей качества машин под влиянием тех факторов, которые приводят только к абсолютным изменениям их свойств. Она базируется на двух отраслях знаний: «Математических методах теории надежности» и «Физике отказов».

Первые исследования в области надежности относятся к 50-м годам XX столетия и были вызваны тем, что создаваемая тогда техника не обеспечивала достаточную эффективность ее использования из-за многочисленных отказов. Возникла необходимость объективной оценки параметров надежности, особенно сложных систем, статистико-вероятностном описании наработок до отказа, обработке эксплуатационной информации о поведении машин во времени.

В связи с тем, что процессы, вызывающие отказы, подчиняясь определенным физическим закономерностям, имеют стохастическую (вероятностную) природу, их взаимосвязь с изменением выходных параметров машины довольно сложная. Поэтому **математические методы надежности** основываются на теории вероятностей и математической статистике, а также смежных с ними дисциплинах.

Развитие математических методов теории надежности явилось начальным этапом систематического изучения долговечности и безотказности машин на основе сбора статистической информации об отказах и неисправностях сборочных единиц исследуемых объектов. Однако, как отмечал академик Б.В. Гнеденко: «Математика является лишь средством исследования и расчета, но не самоцелью. Во главе всегда должна быть инженерная проблема, и для ее решения должен привлекаться тот научный аппарат, который ближе всего соответствует природе изучаемого явления». Другими словами, исследование надежности только математическими методами без учета физических процессов, которые вызывают изменение технического состояния машин, не может обеспечить их высокий уровень работоспособности.

С появлением современных методов физических исследований и соответствующего экспериментального оборудования появилась возможность не только математического описания процессов изменения технического состояния изделий, но и объективной оценки влияния различных факторов на характер протекания этих процессов.

Поэтому второй теоретической основой науки о надежности являются результаты исследований естественных наук, изучающих физико-химические процессы разрушения, старения и изменения

свойств материалов, из которых изготовлены машины или которые необходимы для их функционирования (топливо, смазки и другие материалы). Сюда относятся отрасли знаний, изучающие процессы механического разрушения материалов (сопротивление материалов), изменения в материалах и поверхностных слоях деталей (физико-химическая механика, триботехника), химические процессы (коррозия, старение) и др. Результаты этих наук в теории надежности сконцентрированы в области, которая носит название «Физика отказов».

Физика отказов изучает необратимые процессы, приводящие к потере материалом изделий начальных свойств при эксплуатации. Изучение этих процессов во времени является базой для решения основных задач надежности.

Современный уровень развития техники позволяет достичь практически любых показателей качества и надежности машины. Однако затраты на достижение этой цели могут быть столь высоки, что эффект от повышения уровня надежности не возместит их, и суммарный результат от проведенных мероприятий будет отрицательным. В связи с этим оценка достигнутого уровня надежности и необходимость его повышения должна решаться в прежде всего с позиций экономики, так как она является основным критерием для решения большинства практических вопросов надежности.

При обосновании оптимального уровня надежности широкое применение в настоящее время находят технико-экономические методы, в основе которых лежит критерий экономической эффективности использования машины по назначению. Оптимальный уровень надежности в соответствии с этим критерием находится по минимуму суммарных удельных приведенных затрат $C_{уд}(t)$ на приобретение и эксплуатацию машин (в рублях на единицу наработки t):

$$C_{уд}(t) = C_{пр}(t) + C_3(t), \quad (1.1)$$

где $C_{пр}(t)$ — удельные приведенные затраты на приобретение машины; $C_3(t)$ — средние удельные затраты на эксплуатацию машины.

Удельные приведенные затраты на приобретение машины, включающие проектирование, испытания, производство, транспортировку и др., определяются отношением ее цены C к ресурсу T_3 :

$$C_{пр}(t) = C / T_3. \quad (1.2)$$

Средние удельные затраты на эксплуатацию машину, связанные с поддержанием машины в работоспособном состоянии и расходами

на эксплуатационные материалы за ресурс T_3 , определяются выражением:

$$C_3(t) = \frac{C_{\text{то}} + C_{\text{тр}} + C_{\text{эм}} + C_{\text{зч}} + C_{\text{от}}}{T_3}, \quad (1.3)$$

где $C_{\text{то}}$, $C_{\text{тр}}$, $C_{\text{эм}}$, $C_{\text{зч}}$, $C_{\text{от}}$ — затраты на ТО, ТР, эксплуатационные материалы, запасные части и оплату труда производственных рабочих.

В рассматриваемой структуре затрат особо следует выделить непосредственно связанные с надежностью машин, поскольку в общих эксплуатационных расходах на содержание машин преобладают потери материальных ресурсов из-за недостаточного уровня их надежности. Однако увеличение уровня надежности требует дополнительных капитальных вложений в производство машин, что отражается на росте цен и, соответственно, на увеличении удельных приведенных затрат на их приобретение $C_{\text{пр}}(t)$.

Однако при недостаточных затратах на создание машины трудно обеспечить ее хорошую конструкторскую разработку и качественное изготовление, а следовательно, и высокие показатели надежности. Поэтому при низком уровне надежности создаваемой машины существенно увеличиваются удельные затраты на ее эксплуатацию $C_3(t)$.

Схематично теоретическая модель зависимости удельных приведенных затрат от уровня надежности представлена на рис. 1.1.

Таким образом, с увеличением уровня надежности машины удельные приведенные затраты, связанные с приобретением машины $C_{\text{пр}}(t)$, растут, так как требуют дополнительных капиталовложений. Но при этом средние приведенные затраты на ее эксплуатацию $C_3(t)$, наоборот, имеют тенденцию к снижению. В связи с этим кривая суммарных удельных приведенных затрат $C_{\text{уд}}(t) = C_{\text{пр}}(t) + C_3(t)$ имеет на

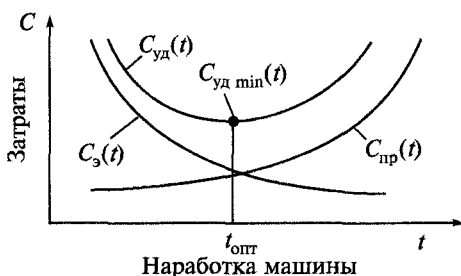


Рис. 1.1. Схема обоснования оптимального уровня надежности машины

какой-то наработке имеет минимум, который и соответствует оптимальному уровню надежности

$$C_{уд}(t) = \min [C_{пр}(t) + C_э(t)]. \quad (1.4)$$

Однако отыскание оптимального уровня надежности на стадии проектирования машины является достаточно сложной задачей, связанной с необходимостью определения зависимости между затратами на повышение надежности всех основных элементов машины и тем эффектом, который может быть получен за счет сокращения расходов на ее эксплуатацию.

Решение задачи упрощается при наличии прототипа машины, характеристики надежности которой, а также условия эксплуатации известны. В этом случае общую задачу повышения надежности машины разбивают на отдельные этапы нахождения минимальных удельных затрат для каждого планируемого мероприятия.

Повышение уровня надежности машин достигается различными методами (созданием необходимых условий для оптимальных температурных режимов работы деталей, резервированием элементов и систем, рациональным выбором материалов пар трения, повышением точности изготовления, внедрением новых упрочняющих технологий и т. д.). При оценке эффективности этих мероприятий необходимо проанализировать необходимые затраты на их проведение и последующие расходы на эксплуатацию. Решение о целесообразности проведения тех или иных технических решений, направленных на повышение надежности, следует принимать по критерию минимальных удельных приведенных затрат.

Для производителя в условиях конкурентных взаимоотношений важно выпускать машины, уровень надежности которых соответствует минимальным суммарным приведенным затратам, так как удешевление машин приводит к росту эксплуатационных расходов на поддержание их в работоспособном состоянии, удорожание — к росту удельных приведенных затрат на их приобретение.

1.2. Термины и определения в теории надежности

Каждое техническое устройство, в том числе и автомобиль, характеризуется определенными выходными параметрами, т. е. величинами, определяющими показатели качества. Эти параметры могут ха-

характеризовать самые разнообразные свойства машины в зависимости от ее назначения и тех требований, которые к ней предъявляются.

В соответствии с ГОСТ 15467—79 под **качеством машин** (изделий) понимается совокупность свойств, обуславливающих пригодность изделия для выполнения им своего функционального назначения. Применительно к автомобилям основными свойствами, характеризующими их качество, являются: надежность, грузоподъемность, маневренность, безопасность, динамичность, производительность, топливная экономичность и др. Эти свойства закладываются при проектировании автомобиля, обеспечиваются при его производстве и реализуются в процессе эксплуатации.

Под **качеством автомобиля** понимается совокупность свойств, определяющих степень его пригодности к выполнению заданных функций при использовании по назначению.

Каждое из этих свойств оценивается одним или несколькими *параметрами*, которые в процессе эксплуатации принимают различные количественные значения, именуемые *показателями*. Таким образом, при анализе и оценке качества автомобилей последовательно рассматривается цепочка свойств, параметров и показателей, представленная на рис. 1.2.

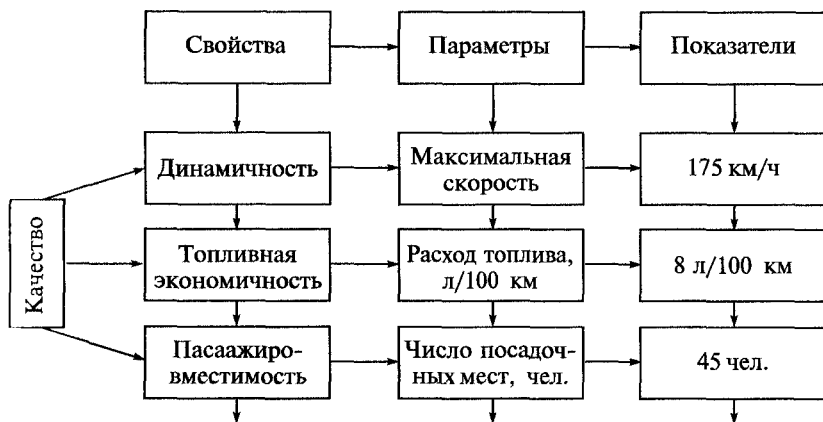


Рис. 1.2. Структура понятия качества автомобиля

Важнейшим свойством любого изделия, позволяющим количественно оценить изменение показателей качества во времени, является надежность.

Надежность — это свойство любого изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования (ГОСТ 27.002—89).

В современной литературе даны и более простые формулировки понятия надежности. Под *надежностью автомобиля*, например, принято понимать его свойство выполнять транспортную работу, сохраняя во времени или по пробегу эксплуатационные показатели в требуемых пределах. Другими словами, качественно изготовленный и правильно эксплуатируемый автомобиль в течение всего ресурсного пробега должен выполнять транспортную работу без каких-либо простоев, кроме тех, которые необходимы для проведения в плановом порядке профилактических и ремонтных операций, обеспечивающих его работоспособное состояние.

1.2.1. Классификация объектов и их состояний

В теории надежности термин «объект» используется в качестве наиболее общего наименования изделия определенного целевого назначения. Объектами автомобиля могут быть агрегаты, системы, узлы, отдельные сборочные единицы, т. е. его конструктивные элементы. Объектом является и сам автомобиль.

В зависимости от того, предусмотрены ли нормативно-технической и (или) конструкторской документацией для данного изделия операции технического обслуживания, изделия подразделяются на обслуживаемые и необслуживаемые. В зависимости от того, предусмотрены ли для изделия операции ремонта, они подразделяются на ремонтируемые и неремонтируемые. В соответствии с возможностью восстановления утраченного в процессе эксплуатации работоспособного состояния изделия различают восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Восстанавливаемыми называют такие изделия, для которых восстановление работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации. Такие изделия после проведения необходимых ремонтных операций продолжают выполнять свои функции. Типичными примерами восстанавливаемых объектов являются двигатели внутреннего сгорания, ко-

робки передач, сцепления и другие механизмы автомобиля. При этом под восстановлением изделия понимается не только проведение тех или иных ремонтных операций, но и замена отказавших элементов.

Невосстанавливаемыми называют изделия, для которых при потере работоспособности проведение ремонтных работ не предусмотрено нормативно-технической документацией. Такие изделия подлежат замене после первого отказа. Примерами их являются электронные приборы в системах управления современного автомобиля, подшипники качения, тормозные колодки и др.

Большинство объектов автостроения (автомобили, агрегаты, системы) относятся к восстанавливаемым. При этом, если при ремонте объекта, двигателя например, отказавшие элементы заменяются новыми (топливные форсунки, свечи зажигания и т. п.), то двигатель является восстанавливаемым объектом, а заменяемые отказавшие элементы — невосстанавливаемыми.

Эксплуатационные показатели машины по мере увеличения нагрузки изменяются от начальных до предельных значений, когда ее дальнейшая эксплуатация по техническим, экономическим, экологическим или другим причинам недопустима. Соответственно изменяется и техническое состояние объекта, которое определяется совокупностью изменяющихся в процессе эксплуатации свойств его элементов, характеризующихся текущими значениями конструктивных параметров.

Таковыми параметрами объектов автотранспортной техники могут быть:

- размеры и конфигурации деталей;
- взаимное расположение деталей;
- зазоры и люфты в агрегатах, узлах и механизмах;
- значения электрических и гидравлических сопротивлений в системах и др.

Основными причинами изменения значений конструктивных параметров и, соответственно, технического состояния при эксплуатации являются: нагружение конструктивных элементов; их взаимное перемещение; воздействие тепловой, химической и электрической энергии; воздействие внешней среды и др.

Различают следующие пять основных видов технического состояния автомобилей: исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное, предельное.

Исправное состояние — это нормальное и естественное состояние автомобиля, при котором он соответствует всем требованиям норма-

тивно-технической документации (НТД). Исправное состояние является наиболее продолжительным в жизненном цикле автомобиля и нормальным с позиции эксплуатации. Поддержание исправного состояния, безусловно, требует определенных эксплуатационных затрат на выполнение предусмотренных работ по ТО и ремонту, включая контроль и диагностику.

Состояние автомобиля, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований НТД, называется **неисправным состоянием** (неисправностью). Переход автомобиля из исправного состояния в неисправное происходит вследствие какого-либо повреждения, при этом его работоспособность сохраняется.

Работоспособный автомобиль, в отличие от исправного, должен удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное использование объекта по назначению. Нормативно-техническая документация предусматривает уровень внешних воздействий на автомобиль, методы ТО и ремонта, затраты на ремонт, нормативы и допустимые отклонения от установленных параметров.

Неработоспособным называется состояние, при котором автомобиль не может выполнять свои функции вследствие возникновения отказа.

Понятие «исправность» шире, чем понятие «работоспособность». Исправный объект, как правило, работоспособен. Работоспособный объект может быть и «неисправным», когда возможные повреждения не влияют на его функционирование (например, помято крыло, отслоилась краска, увеличились зазоры и т. п.).

Предельным называется состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Невозможность дальнейшего применения объекта может являться следствием неустранимого нарушения требований безопасности, неустранимого ухода заданных параметров (параметра) за установленные пределы, неустранимого снижения эффективности эксплуатации, необходимости капитального ремонта.

При оценке технического состояния машин и их конструктивных элементов широко используется понятие **предотказного** состояния, при котором остаточный ресурс изделия меньше плановой межремонтной наработки. Эксплуатация машин с таким состоянием с

большой долей вероятности может привести к отказу в пределах этой наработки.

Совокупность фактических состояний изделий составляет так называемый **жизненный цикл**, протекающий во времени (или по наработке) и имеющий вполне определенные закономерности, изучаемые в теории надежности.

Переход автомобиля из одного состояния в другое (т. е. ниже-стоящее) происходит вследствие повреждений или отказов.

1.2.2. Отказы машин и их классификация

Центральным понятием в теории надежности является **отказ**, под которым понимается полная или частичная потеря объектом (автомобилем, агрегатом, узлом, системой) работоспособности. При наступлении отказа изделие не может выполнять заданные функции, или параметры его технического состояния выходят за допустимые пределы.

Типовой перечень характерных отказов автомобиля в процессе эксплуатации приведен в табл. 1.1.

В отличие от отказа, под **повреждением** понимается событие, заключающееся в нарушении исправности при сохранении объектом работоспособного состояния.

При эксплуатации машин несвоевременное выявление и устранение повреждений может привести к отказу. Например, развитие таких повреждений, как мелкие трещины, небольшие деформации, пористости изоляции, нарушения регулировок в случае их несвоевременного устранения приводят к нарушению функционирования, т. е. потере работоспособности.

Причины, по которым объект теряет работоспособность, можно подразделить на две основные группы:

- разрушение элементов (поломки, износы, пластические деформации, обрывы и замыкания электропроводки и т. п.);
- ухудшение качества функционирования (нарушение регулировок механизмов и систем, ослабление контактов и креплений под действием вибраций, нарушение герметичности соединений в гидравлических и пневматических системах и др.).

Современный автомобиль включает от 15 до 25 тыс. деталей, составляющих его агрегаты, системы, узлы и механизмы. Примерно 20—22 % из них относятся к деталям, лимитирующим надежность

Таблица 1.1. Причины потери машиной работоспособности

Характер отказа	Примеры отказавших элементов
Износ	Рабочие поверхности деталей
Трещина	Рамы, кузова, детали
Остаточная деформация	Кузова, зубья шестерен, шлицевые соединения
Коррозия	Поверхности металлоконструкций
Повреждение резьбы	Винтовые и резьбовые соединения
Поломка	Болты, шпильки, штифты
Ослабление посадки	Отверстия под подшипники, втулки
Пробоина	Корпусные детали, баки, поддоны картеров, шины колес
Потеря упругости	Пружины
Нарушение регулировки	Углы установки колес, тормозные системы
Ослабление крепления	Винтовые и резьбовые соединения
Разрыв	Трубопроводы, шланги, ремни
Растрескивание, расслоение	Шланги, ремни, шины колес
Нарушение герметичности	Гидравлические и пневматические системы
Потеря эластичности, старение	Резинотехнические изделия, уплотнения
Электрическое повреждение (пробой, замыкание, обрыв, нарушение контакта)	Элементы электропривода
Перегорание	Приборы освещения

(срок службы которых меньше срока службы автомобиля), а около 200—300 деталей являются критическими по надежности (срок их службы не превышает одного года).

Для предупреждения отказов необходимо знать причины их возникновения и проявления, а также влияние, которое они оказывают на работоспособность автомобиля. В табл. 1.2 приведена классификация основных отказов автомобилей в зависимости от этих факторов.

Таблица 1.2. Классификация отказов автомобилей

Классификационный признак	Вид отказа
Источник и причина возникновения	Конструктивный. Производственный. Эксплуатационный. Деградационный
Характер изменения параметра технического состояния	Постепенный. Внезапный
Внешнее проявление	Явный. Скрытый
Взаимосвязь с другими отказами	Зависимый. Независимый
Последствия отказа	Функционирования. Параметрический
Место и время обнаружения	При выполнении рабочих функций (линейный). При выполнении ТО или ремонта

Конструктивные отказы возникают по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования объекта. Главным образом, они обусловлены недостатками конструкции автомобиля. Например, неудачно выполнена конструктивная схема, в конструктивных элементах имеются концентраторы напряжений, не учтены условия эксплуатации, не защищены узлы трения от попадания абразивов и влаги, неправильно выбраны материалы и масла и др.

Производственные отказы возникают из-за несовершенства или нарушения технологического процесса изготовления деталей, узлов и агрегатов или их ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии. Например, отклонение размеров детали от заданных чертежом, дефекты при получении заготовок, ошибки при механической обработке, дефекты сварки и термообработки, некачественное проведение крепежных и регулировочных работ, отсутствие должного входного контроля поступающих материалов и комплектующих и т. д.

Эксплуатационные отказы связаны с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации. Несоблюдение периодичности технического обслуживания, использование некачественных эксплуатационных материалов, невысокая квалификация производст-

Таблица 1.1. Причины потери машиной работоспособности

Характер отказа	Примеры отказавших элементов
Износ	Рабочие поверхности деталей
Трещина	Рамы, кузова, детали
Остаточная деформация	Кузова, зубья шестерен, шлицевые соединения
Коррозия	Поверхности металлоконструкций
Повреждение резьбы	Винтовые и резьбовые соединения
Поломка	Болты, шпильки, штифты
Ослабление посадки	Отверстия под подшипники, втулки
Пробоина	Корпусные детали, баки, поддоны картеров, шины колес
Потеря упругости	Пружины
Нарушение регулировки	Углы установки колес, тормозные системы
Ослабление крепления	Винтовые и резьбовые соединения
Разрыв	Трубопроводы, шланги, ремни
Растрескивание, расслоение	Шланги, ремни, шины колес
Нарушение герметичности	Гидравлические и пневматические системы
Потеря эластичности, старение	Резинотехнические изделия, уплотнения
Электрическое повреждение (пробой, замыкание, обрыв, нарушение контакта)	Элементы электропривода
Перегорание	Приборы освещения

(срок службы которых меньше срока службы автомобиля), а около 200—300 деталей являются критическими по надежности (срок их службы не превышает одного года).

Для предупреждения отказов необходимо знать причины их возникновения и проявления, а также влияние, которое они оказывают на работоспособность автомобиля. В табл.1.2 приведена классификация основных отказов автомобилей в зависимости от этих факторов.

Таблица 1.2. Классификация отказов автомобилей

Классификационный признак	Вид отказа
Источник и причина возникновения	Конструктивный. Производственный. Эксплуатационный. Деградационный
Характер изменения параметра технического состояния	Постепенный. Внезапный
Внешнее проявление	Явный. Скрытый
Взаимосвязь с другими отказами	Зависимый. Независимый
Последствия отказа	Функционирования. Параметрический
Место и время обнаружения	При выполнении рабочих функций (линейный). При выполнении ТО или ремонта

Конструктивные отказы возникают по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования объекта. Главным образом, они обусловлены недостатками конструкции автомобиля. Например, неудачно выполнена конструктивная схема, в конструктивных элементах имеются концентраторы напряжений, не учтены условия эксплуатации, не защищены узлы трения от попадания абразивов и влаги, неправильно выбраны материалы и масла и др.

Производственные отказы возникают из-за несовершенства или нарушения технологического процесса изготовления деталей, узлов и агрегатов или их ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии. Например, отклонение размеров детали от заданных чертежом, дефекты при получении заготовок, ошибки при механической обработке, дефекты сварки и термообработки, некачественное проведение крепежных и регулировочных работ, отсутствие должного входного контроля поступающих материалов и комплектующих и т. д.

Эксплуатационные отказы связаны с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации. Несоблюдение периодичности технического обслуживания, использование некачественных эксплуатационных материалов, невысокая квалификация производ-

венно-технического персонала могут привести к преждевременным отказам.

Деградационными называют отказы, обусловленные естественными процессами старения, деформирования, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Постепенными называют отказы, которые возникают в результате протекания того или иного процесса старения, ухудшающего начальные параметры элементов автомобиля. Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $P(t)$ в течение заданного пробега от t_1 до t_2 зависит от длительности предыдущей работы (рис. 1.3, а).

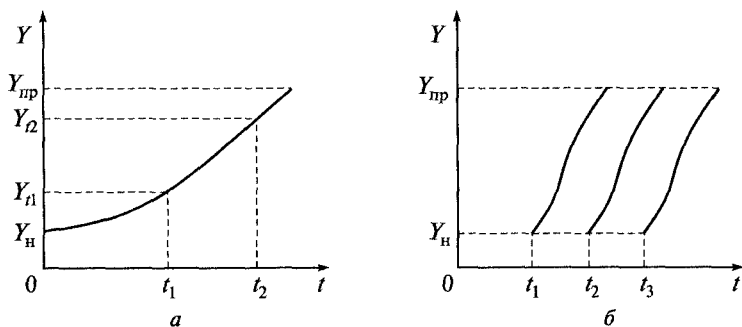


Рис. 1.3. Изменение параметра технического состояния Y по наработке t при постепенных (а) и внезапных (б) отказах:

Y_n и Y_{pr} — начальное и предельное значения параметров

Чем больше наработка автомобиля, тем выше вероятность возникновения отказа

$$P(t_2 + \Delta t) > P(t_1 + \Delta t) \text{ при } t_2 > t_1. \quad (1.5)$$

Это связано с тем, что в процессе эксплуатации объекта происходит накопление в нем необратимых изменений, обусловленных износом и старением материалов, накоплением усталостных повреждений, а также коррозионными, эрозионными и другими воздействиями. К этому виду отказов относится большинство отказов автомобиля.

Внезапные отказы возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности элемента автомобиля к их восприятию.

Такой отказ возникает после некоторой наработки t (рис. 1.3, б), которая является случайной величиной и вероятность его возникновения $P(t)$ в течение заданного периода от t_1 до t_2 не зависит от длительности предыдущей эксплуатации, т. е.

$$P(t_1 + \Delta t) \approx P(t_2 + \Delta t) \text{ при } t_2 > t_1. \quad (1.6)$$

Примерами таких отказов могут служить тепловые трещины, возникающие в деталях вследствие прекращения подачи смазки, деформации и поломки деталей, попавших в такие условия работы, когда каждый параметр принимает экстремальное значение (наибольшая нагрузка, минимальная твердость, повышенная температура и т. д.). Выход из строя при этом происходит, как правило, внезапно, без предшествующих симптомов.

Явными считаются отказы, обнаруживаемые визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования. Для их выявления требуются небольшие затраты времени, не превышающие установленные нормативы.

Скрытыми являются отказы, которые не могут быть обнаружены визуально или штатными методами и средствами контроля. Они выявляются при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.

Зависимыми считаются отказы, возникновение которых явилось следствием других отказов (повышенный износ деталей двигателя из-за неисправностей в системе смазки, отказ редуктора заднего моста вследствие усталостного разрушения зуба шестерни и др.).

Независимыми называются отказы, возникновение которых не зависит от других отказов или неисправностей (пробоина в топливном баке, прокол шины и т. п.).

Отказы функционирования приводят к тому, что автомобиль или какой-либо его агрегат, узел не может выполнять свои функции. Например, в результате отказа системы питания или зажигания двигатель не заводится, насос не подает масло и т. д.

Параметрический отказ приводит к выходу параметров (характеристик изделия) за допустимые пределы. Такие отказы, например, как снижение мощности, топливной экономичности, увеличение зазоров в сопряжениях не ограничивают дальнейшую эксплуатацию автомобиля, однако выполняемые им функции оказывают негативное влияние на безопасность движения, экономические, экологические и другие показатели его работы.

Линейные отказы возникают в режиме рабочего времени автомобиля на линии и нарушают транспортный процесс.

Отказы, выявленные в нерабочее время, как правило, при техническом обслуживании и диагностировании автомобиля своевременно устраняются, не нарушая транспортный процесс.

1.2.3. Свойства надежности машин

Надежность является сложным (комплексным) свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения характеризуется сочетанием более простых свойств: безотказностью; долговечностью; ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Следовательно, безотказность определяет непрерывную работу объекта без каких-либо вмешательств для поддержания его работоспособности, т. е. технических обслуживаний и ремонтов.

Это свойство надежности особенно важно для узлов и систем автомобиля, непосредственно влияющих на безопасность движения (тормозная система, рулевое управление, внешние световые приборы, колеса и шины). Отказы таких систем могут привести к дорожно-транспортным происшествиям с весьма тяжелыми последствиями. Безотказность является основным свойством также для невозстанавливаемых изделий.

Долговечность — свойство автомобиля сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Таким образом, долговечность автомобиля анализирует его работу за весь период эксплуатации и учитывает, что длительная работа невозможна без проведения необходимых для поддержания его технически исправного состояния ремонтных и профилактических мероприятий.

Ремонтпригодность — свойство автомобиля, определяющее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта.

Это свойство, с одной стороны, характеризует качество конструкторских решений по предупреждению и обнаружению возможных отказов, а с другой — показывает, ценой каких трудозатрат обеспечивается требуемый уровень надежности изделия. В технической эксплуа-

тации автомобилей под ремонтпригодностью (в узком значении) понимают просто приспособленность изделий к ремонту.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение и после срока хранения и (или) транспортирования. Сохраняемостью определяются целесообразные сроки хранения и консервации автомобилей, а также допустимые расстояния транспортирования, после которых они остаются пригодными для дальнейшей эксплуатации без ремонта. Повышенные требования предъявляются к изделиям, которые должны эксплуатироваться в особых климатических условиях, в частности, северных или тропических, или долго храниться. Это свойство зависит от качества изготовления, интенсивности протекания в элементах автомобиля процессов старения, а также таких внешних факторов, как температура и влажность воздуха, агрессивность окружающей среды и др.

1.3. Количественные показатели надежности

В соответствии с ГОСТ 27.002—89 для оценки надежности применяются количественные показатели ее отдельных свойств (безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости), а также комплексные показатели, характеризующие готовность и эффективность использования изделий. Показатели надежности количественно характеризуют, в какой степени конкретному изделию присущи определенные свойства, обуславливающие его надежность. Они могут иметь размерность (например, наработка на отказ в тысячах километров) или не иметь ее (вероятность безотказной работы, коэффициент технического использования).

1.3.1. Показатели безотказности

Для количественной оценки безотказности используют следующие показатели:

- вероятность безотказной работы;
- среднюю наработку на отказ;
- среднюю наработку до отказа;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов.

Вероятность безотказной работы — это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникнет. Этот показатель применяется как для восстанавливаемых, так и для невосстанавливаемых изделий. При назначении или определении этого показателя указывается наработка t , в течение которой его значение должно находиться в пределах заданной величины.

Значение вероятности безотказной работы $P(t)$, как и всякой вероятности, находится в пределах

$$0 \leq P(t) \leq 1. \quad (1.7)$$

Физический смысл $P(t)$ заключается в следующем. Если, например, $P(t)$ какого-либо изделия (автомобиля, отдельного агрегата, системы) на пробеге $t = 0—50$ тыс. км равна 0,95. Это означает, что из большого их количества в среднем около 5 % потеряет свою работоспособность на этом пробеге. Остальные же 95 % не будут иметь ни одного отказа.

Показатель $P(t)$ может быть использован и для оценки безотказности одного изделия. В этом случае он определяет шансы изделия проработать без отказов заданный пробег.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $F(t)$ образуют полную группу событий:

$$P(t) + F(t) = 1. \quad (1.8)$$

С увеличением пробега автомобиля вероятность его безотказной работы уменьшается, и соответственно, увеличивается вероятность отказа (рис. 1.4).

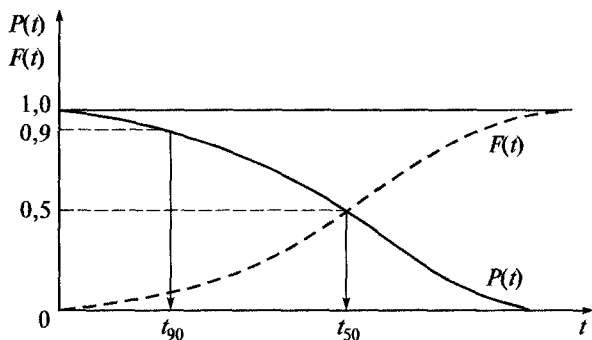


Рис. 1.4. Изменение вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$ по наработке t

Функция $P(t)$ позволяет применительно к отдельно взятому элементу конструкции предвидеть и количественно оценить возможность отказа на том или ином пробеге. Она определяется из выражения

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt, \quad (1.9)$$

где $f(t)$ — плотность вероятности распределения наработки до отказа.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы $P(t)$ по результатам испытаний определяется отношением числа исправных изделий к общему числу находящихся под наблюдением изделий на протяжении наработки t :

$$\bar{P}(t) = \frac{N - \sum_{j=1}^r m_j}{N}, \quad (1.10)$$

где N — число работоспособных изделий на начало наблюдений; m_j — число изделий, отказавших в j -м интервале наработки; $r = t/\Delta t$ — количество интервалов наработки.

Средняя наработка на отказ — это среднее значение наработки восстанавливаемого изделия между отказами. Статистическая оценка этого показателя определяется отношением суммарной наработки изделия к числу отказов в течение этой наработки

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{T}{n}, \quad (1.11)$$

где $t_1, t_2, \dots, t_n$ — наработки изделия между отказами; T — суммарная наработка изделия за время испытаний; n — количество отказов на этой наработке.

Если наработка от начала эксплуатации до t разбита на r интервалов Δt и число отказов внутри каждого интервала равно m_j , то

$$\bar{t} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_r t_r}{m_1 + m_2 + \dots + m_r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r m_j t_j, \quad (1.12)$$

где $n = m_1 + m_2 + \dots + m_r$; $t_1, t_2, \dots, t_r$ — средняя наработка изделия в каждом интервале.

Средняя наработка до отказа — это среднее значение наработки невосстанавливаемого изделия до первого отказа. Статистическая оценка данного показателя определяется отношением суммы наработок испытуемых объектов до первого отказа к их количеству. Если довести испытания до момента, когда все испытуемые изделия отказали, то средняя наработка до отказа определяется по формуле

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j, \quad (1.13)$$

где $t_1, t_2, \dots, t_N$ — наработки изделий до первого отказа.

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Определение этого показателя базируется на понятии *плотности вероятности отказа* в момент времени t , под которой понимается предел отношения вероятности отказа в интервале времени от t до $t + \Delta t$ к величине этого интервала Δt при $\Delta t \rightarrow 0$. Физический смысл плотности вероятности отказа — это вероятность отказа в достаточно малую единицу времени:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t}. \quad (1.14)$$

Из определения интенсивности отказов $\lambda(t)$ следует, что

$$P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t)\Delta t, \quad (1.15)$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы за время t ; $f(t)$ — плотность распределения наработки до отказа.

Тогда интенсивность отказов определяется отношением

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (1.16)$$

Из этого выражения следует, что достаточно знать одну из трех функций $\lambda(t)$, $f(t)$ или $P(t)$, по формулам (1.15) и (1.16) можно определить остальные две.

Графическая интерпретация изменения интенсивности отказов $\lambda(t)$ и плотности вероятностей $f(t)$ показана на рис. 1.5.

На I участке (период приработки) отказы объекта, возникновение которых обусловлено дефектами производства, имеют повышенную

интенсивность. К началу *II* периода интенсивность отказов снижается и сохраняется примерно постоянной ($\lambda = \text{const}$) на всем периоде нормальной эксплуатации. Отказы в этот период носят преимущественно случайный характер и возникают, в основном, вследствие нарушения условий эксплуатации.

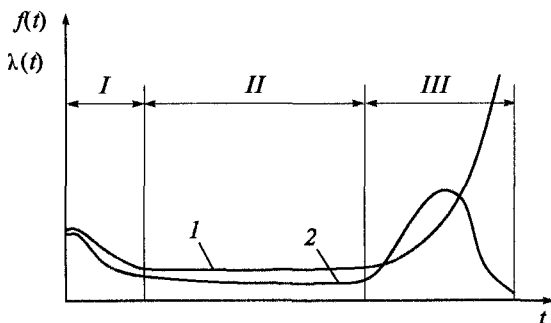


Рис. 1.5. Типичные зависимости интенсивности $\lambda(t)$ — 1 и плотности вероятностей $f(t)$ — 2 по наработке t

В *III* периоде интенсивность отказов резко возрастает вследствие изнашивания, старения, накопления повреждений и других процессов в узлах и деталях машины. Когда интенсивность отказов достигает определенного уровня, дальнейшая эксплуатация становится нецелесообразной, и машина направляется или в капитальный ремонт, или на списание.

Как следует из рис. 1.5, кривая плотности вероятности отказов $f(t)$ до некоторой наработки располагается близко от кривой $\lambda(t)$. Далее с уменьшением вероятности безотказной работы $P(t)$ она постепенно снижается. На третьем участке, когда интенсивность отказов начинает стремительно расти, плотность вероятности вначале увеличивается, а затем снижается до нуля, т. е. $f(t) \rightarrow 0$.

Статистическая оценка этого показателя по результатам экспериментальных исследований находится по формуле

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (1.17)$$

где $N(t)$, $N(t + \Delta t)$ — количество работоспособных изделий при наработках t и $t + \Delta t$; Δt — интервал наработки.

Из выражения (1.17) следует, что интенсивность отказов $\lambda(t)$ представляет собой количество отказов, приходящихся на одно работоспособное изделие $N(t)$ за единицу наработки Δt .

Параметр потока отказов представляет собой отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{m(t + \Delta t) - m(t)\}}{\Delta t}, \quad (1.18)$$

где Δt — малый отрезок наработки; $m(t)$ — число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки t ; разность $m(t + \Delta t) - m(t)$ представляет собой число отказов на отрезке Δt .

Статистическую оценку для параметра потока отказов $\bar{\omega}(t)$ определяют по формуле

$$\bar{\omega} = \frac{m(t_2) - m(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (1.19)$$

По сравнению с формулой (1.18) здесь рассматривается число отказов за конечный отрезок времени (t_1, t_2) , причем $t_1 \leq t \leq t_2$.

Ресурсные испытания и наблюдения за большими выборками объектов показывает, что в большинстве случаев изменение параметра потока отказов $\omega(t)$ протекает во времени или по наработке немонотонно, примерно также, как и интенсивность отказов $\lambda(t)$. На участке I (рис. 1.6) происходит нарастание потока отказов, которое связано с выходом из строя деталей и узлов, имеющих дефекты изготовления и сборки (участок приработки). На участке II поток отказов можно считать постоянным, это участок нормальной эксплуатации машины, на котором происходят, главным образом, внезапные отказы.

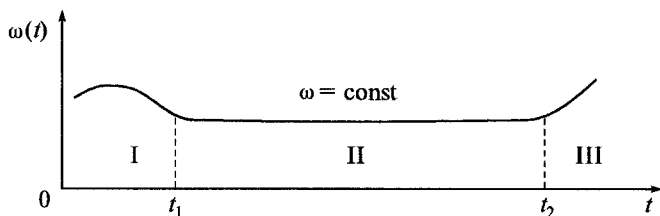


Рис. 1.6. Изменение параметра потока отказов ω по наработке t

На участке III параметр потока отказов $\omega(t)$ резко возрастает вследствие интенсификации тех же факторов, которые характеризуют рост интенсивности изнашивания $\lambda(t)$, т. е. накопления повреждений в узлах и деталях машины.

Наиболее продолжительным периодом работы машины является участок II, на котором параметр потока отказов остается почти на одном уровне при постоянстве условий эксплуатации, т. е. $\omega(t) = \text{const}$. Поэтому среднее число отказов на этом участке может быть определено по формуле

$$m_{\text{cp}}(t) = \omega(t)\bar{t}. \quad (1.20)$$

Наработка на отказ $\bar{t}$ за любой период работы Δt на участке II определяется из выражения

$$\bar{t} = \frac{1}{\omega(t)} = \text{const}. \quad (1.21)$$

1.3.2. Показатели долговечности

Для оценки долговечности машин используются следующие показатели:

- средний ресурс;
- средний срок службы;
- гамма-процентный ресурс.

Под **ресурсом** понимается суммарная наработка изделия от начала эксплуатации (или ее возобновления после капитального ремонта) до предельного состояния, оговоренного технической документацией. Применительно к автомобильной технике различают средний ресурс до списания, средний ресурс до капитального ремонта и средний ресурс между капитальными ремонтами (КР).

Срок службы — это календарная продолжительность эксплуатации изделия от ее начала (или возобновление после КР) до наступления предельного состояния.

Таким образом, понятие «ресурс» применяется при характеристике долговечности по наработке изделия, а «срок службы» — по календарному времени. Как ресурс, так и срок службы изделий зависят от большого числа факторов, обусловленных погрешностями их производства и условиями эксплуатации. В связи с этим и ресурс, и срок службы являются случайными величинами.

Средний ресурс определяется по формуле

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad (1.22)$$

где N — число изделий, находящихся под наблюдением; T_i — наработка i -го изделия до КР или списания.

Гамма-процентный ресурс — это наработка, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Гамма-процентный ресурс легко определяется по графику вероятности безотказной работы $P(t)$ (рис. 1.7, а).

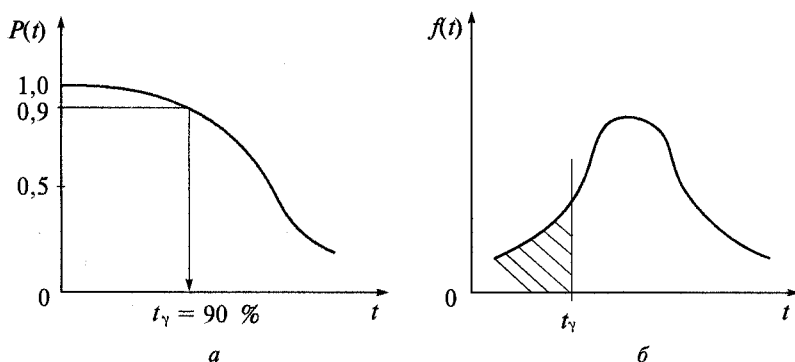


Рис. 1.7. Схема определения γ -процентного ресурса

Для этого через точку $P(t) = \gamma$ на оси ординат следует провести горизонталь до пересечения с кривой вероятности безотказной работы. Абсцисса точки пересечения и будет γ -процентным ресурсом. Например, для $\gamma = 90\%$ соответствует наработка $t_\gamma = 90\%$, которая и является γ -процентным ресурсом для данного изделия.

Для партии изделий γ -процентный ресурс представляет собой наработку, которую имеют или превышают обусловленный процент изделий γ (рис. 1.7, б). Вертикальная линия с абсциссой, равной γ -процентному ресурсу, рассекает площадь под кривой $f(t)$ на две области: справа находится область, площадь которой равна вероятности работы без нарушения работоспособного состояния, а слева — область, площадь которой равна вероятности работы с возможными отказами.

При известной функции распределения ресурса γ -процентный ресурс находится из выражения

$$1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{\gamma} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (1.23)$$

1.3.3. Показатели ремонтпригодности

Для оценки ремонтпригодности изделий служат следующие основные показатели:

- вероятность восстановления отказа в заданное время;
- среднее время восстановления отказа;
- средняя трудоемкость восстановления отказа.

Вероятность восстановления отказа в заданное время — это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния $t_{\text{в}}$ не превысит заданное нормативной документацией значение $t_{\text{н}}$, т. е. $P(t_{\text{в}}) \leq P(t_{\text{н}})$.

Среднее время восстановления — это математическое ожидание времени восстановления работоспособности изделия, вызванное отказом. По существу, данный показатель оценивает среднее время простоя изделия на устранение отказа. При этом следует учитывать не только чистое время ремонта, но и время, затрачиваемое на поиск причин отказа.

Если на поиск причин отказов и их устранение затрачено время $t_1, t_2, \dots, t_m$, то среднее время восстановления определяется по формуле

$$\bar{t}_{\text{в}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i, \quad (1.24)$$

где t_i — время восстановления i -го отказа; m — число отказов изделия за определенную наработку.

Средняя трудоемкость восстановления представляет собой математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

Статистическая оценка средней трудоемкости восстановления отказа вычисляется по формуле, аналогичной формуле (1.24), только вместо времени восстановления подставляется трудоемкость в человеко-часах.

В качестве дополнительных показателей для комплексной оценки ремонтпригодности автомобилей используются удельная продолжительность, удельная трудоемкость и удельная стоимость ТО и ремонтов.

Удельная продолжительность ТО и ремонтов — это математическое ожидание суммарной продолжительности технических обслуживаний и ремонтов, отнесенное к единице наработки.

В течение заданной наработки машины, например, до капитального ремонта, для поддержания ее работоспособности многократно выполняются различные виды профилактических и ремонтных работ. Для определения этого показателя необходимо установить методом хронометража суммарное время на ТО и ремонты и разделить это время на ту наработку, в течение которой проводился контроль

$$\bar{\tau}_{\text{ТО-ТР}} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{i\text{ТО-ТР}}}{NT}, \quad (1.25)$$

где $\bar{\tau}_{\text{ТО-ТР}}$ — удельная продолжительность ТО и ремонтов, ч/1000 км; $\tau_{i\text{ТО-ТР}}$ — продолжительность простоя i -го объекта в ТО и ремонтах в течение назначенной наработки T , ч; N — количество объектов, находившихся под наблюдением.

Удельные значения трудоемкости и стоимости ТО и ремонтов определяются аналогичным образом с той лишь разницей, что вместо времени на выполнение работ в формулу подставляются трудоемкость в человеко-часах или стоимость в рублях.

Показатели ремонтпригодности, как нетрудно заметить, сводятся к оценке простоев машин в технических обслуживаниях и ремонтах и затратам на их выполнение. Зависят они от удобства доступа к объектам ремонта и обслуживания, легкосъемности агрегатов, узлов и деталей, степени их взаимозаменяемости и унификации, контролепригодности и др.

1.3.4. Показатели сохраняемости

Сохраняемость машин оценивается показателями, аналогичными тем, которые используются для оценки долговечности:

- средний срок сохраняемости;
- гамма-процентный срок сохраняемости.

Средний срок сохраняемости представляет собой календарную продолжительность хранения и транспортировки объекта в заданных условиях, в течение и после которой сохраняются значения эксплуатационных показателей в установленных пределах.

Гамма-процентным сроком сохраняемости называют календарную продолжительность хранения изделия, которая будет достигнута им с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Эти показатели обычно оценивают сохраняемость объектов, подвергнутых консервации, а также находящихся на складах запасных частей. Они могут характеризовать как автомобиль в целом, так и отдельные его элементы (аккумуляторные батареи, шины, масла, краски и др.).

При соблюдении технологии хранения и консервации изделия должны отвечать всем требованиям, предъявляемым к ним техническими условиями после обусловленного срока хранения. Например, если 90%-ный срок сохраняемости изделия равен двум годам, то после двухлетнего срока хранения 90 изделий из 100 будут полностью соответствовать требованиям технической документации.

1.3.5. Комплексные показатели надежности

Кроме рассмотренных выше показателей, характеризующих одно из свойств надежности и называемых единичными, применяются и комплексные показатели, оценивающие несколько свойств надежности одновременно. К ним относятся коэффициенты готовности и технического использования.

Коэффициент готовности K_r — это вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается:

$$K_r = \frac{t \sum \text{pc}}{t \sum \text{э}} = \frac{t \sum \text{pc}}{t \sum \text{pc} + t \sum \text{p}}, \quad (1.26)$$

где $t \sum \text{э}$ — суммарное время эксплуатации изделия в интервале наработки между плановыми ТО; $t \sum \text{pc}$, $t \sum \text{p}$ — суммарное время пребывания изделия в работоспособном состоянии и ремонте за этот же период.

Коэффициент технического использования $K_{\text{ТИ}}$ представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребыва-

ния 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:

$$K_{т.и} = \frac{t \sum pc}{t \sum pc + t \sum p + t \sum to}, \quad (1.27)$$

где $t \sum pc$ — суммарное время нахождения изделия в работоспособном состоянии на заданной наработке; $t \sum p$, $t \sum to$ — суммарные простои изделия из-за отказов в ремонтах и при проведении технических обслуживаний.

Таким образом, коэффициент технического использования представляет собой вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени на заданной наработке.

Как видно из сравнения K_t и $K_{т.и}$, коэффициент готовности — это тот же коэффициент технического использования, но определяемый за период между плановыми ТО.

1.4. Надежность парка автомобилей

Под **надежностью автомобильного парка (АП)** понимается его свойство выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих определенным условиям использования.

На работу АП и его надежность оказывает влияние большое число факторов: *технических* (надежность автомобилей и их возраст, количество и качество запасных частей и эксплуатационных материалов, обеспеченность и состояние гаражного оборудования и др.); *технологических* (периодичность и качество выполнения ТО и ремонта, соответствие числа постов ТО и ТР потребностям и т. п.); *организационных* (система снабжения запасными частями и агрегатами, простои по различным причинам и др.); *социальных* (обеспеченность кадрами и их текучесть, квалификация и стаж работы водителей и ремонтных рабочих, условия и организация труда, стимулирование персонала и т. д.); *дорожных и природно-климатических* (состояние и обустройство дорог, температура, влажность, запыленность воздуха и др.). Совокупное действие перечисленных факторов приводит к тому, что надежность одного автомобиля не совпадает с надежностью всего парка машин.

Между надежностью отдельно взятого автомобиля и надежностью АП имеются существенные различия.

1. Автомобиль является изделием, обладающим конечным ресурсом, тогда как АП — это непрерывно обновляемая система за счет замены выработавших свой ресурс автомобилей новыми.

2. Элементы автомобиля (агрегаты, узлы и детали) обычно связаны между собой так, что отказ одного из них может привести к отказу автомобиля в целом; в парке автомобили функционируют независимо один от другого.

3. АП, в отличие от автомобиля, не имеет полных отказов; то или иное количество автомобилей всегда выпускается на линию.

4. Возможности для резервирования автомобиля или парка автомобилей разные: в первом случае резервирование элементов может потребовать глубокого вмешательства в конструкцию, во втором, замена или резервирование целых автомобилей осуществляются значительно проще.

5. Экономические возможности и последствия замены элементов автомобиля и элементов парка (т. е. целых автомобилей) разные; своевременное списание автомобилей, выработавших свой ресурс, способствует улучшению показателей эффективности работы парка.

6. Ограниченный простой отдельно взятого автомобиля практически не сказывается на его надежности, тогда как для АП простой даже работоспособного автомобиля рассматривается как частичный отказ.

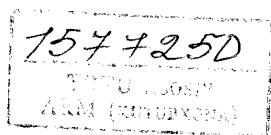
Надежность среднесписочного автомобиля с достаточной степенью точности характеризует **коэффициент технической готовности** α_T (относительное число работоспособных автомобилей):

$$\alpha_T = \frac{D_э}{D_э + D_p}, \quad (1.28)$$

где $D_э$, D_p — суммарные дни пребывания автомобиля на линии (в эксплуатации) и в ТО и ремонте.

Для парка подвижного состава коэффициент технической готовности α_T представляет собой отношение количества автомобиле-дней пребывания автомобилей в эксплуатации $АД_э$ к суммарному количеству календарных автомобиле-дней $АД_{и}$ (автомобиле-дней в эксплуатации и автомобиле-дней в ТО и ремонте):

$$\alpha_T = \frac{АД_э}{АД_{и}} = \frac{АД_э}{АД_э + АД_p}. \quad (1.29)$$



Обобщенной оценкой степени использования парка автомобилей за период D_n служит **коэффициент выпуска подвижного состава на линию** α_v (относительное число автомобилей, направленных заказчику):

$$\alpha_v = \frac{AD_э}{AD_э + AD_p + AD_n}, \quad (1.30)$$

где AD_n — количество автомобиле-дней нормированных простоев, а также простоев из — за отсутствия работы, персонала и др.

Разница между α_t и α_v обусловлена преимущественно простоями автомобилей по организационно-техническим и организационным причинам.

1.4.1. Моделирование процессов функционирования АП и его надежности

В соответствии с Положением о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта автомобиль в парке может находиться в одном из следующих технологических состояний:

- работоспособном (на линии);
- простое в техническом обслуживании (ТО-1 или ТО-2);
- простое в текущем ремонте (ТР);
- ожидании списания после выработки нормативного ресурса.

В реальных условиях эксплуатации в зависимости от организационно-технических и других факторов технологические состояния автомобиля более разнообразны. С точки зрения надежности АП их можно подразделить на линейные, когда автомобиль работоспособен и выполняет свои функции, и нелинейные, когда автомобиль неработоспособен или работоспособен, но по различным организационно-техническим или организационным причинам на линию не поступает.

Простои по организационно-техническим причинам могут быть вызваны необходимостью проведения различных технических воздействий (ТО-2 или ТР), подготовкой нового автомобиля к эксплуатации, простоями автомобилей после ДТП и т. д.

Простои по организационным причинам связаны с отсутствием заказчика транспортных услуг, водителей, ремонтных рабочих, про-

исходить из-за неукомплектованности штатов, болезней, отпусков работников и др.

При анализе надежности АП удобно использовать граф возможных состояний автомобилей, который учитывает принятую в конкретном АТП систему эксплуатации. Один из возможных вариантов обобщенного графа состояний автомобилей представлен на рис. 1.8. В соответствии с графиком производственного процесса автомобиля, помимо работы на линии (состояние S_1), проходят общее Д-1 и углубленное Д-2 диагностирование (состояния S_3 и S_4), плановые ТО-1 и ТО-2 (состояния S_5 и S_7), текущий ремонт (состояние S_6). В случае занятости постов ТО, ремонта или диагностирования автомобиля простаивают в ожидании соответствующих технических воздействий (состояние S_2), а исправные автомобили направляются в зону хранения (состояние S_8).

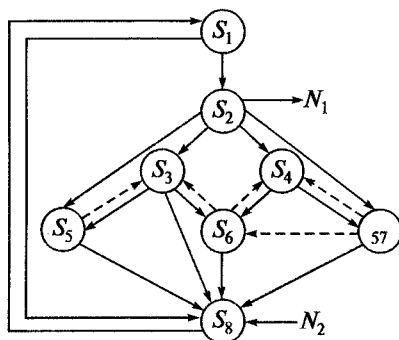


Рис. 1.8. Обобщенный граф возможных состояний автомобилей

Переходы автомобилей из одних состояний в другие многообразны и отображаются на графе стрелками, соединяющими эти состояния. Например, автомобиль, работающий на линии (состояние S_1), может перейти в любое из семи возможных состояний графа. Из состояния S_6 (зона ТР) он может перейти в состояние S_3 , S_4 или S_8 . Стрелка N_1 указывает на убытие автомобилей из АП, вызванное их списанием или продажей, а N_2 — поступление вновь приобретенных автомобилей.

Для оценки надежности АП необходимо прежде всего установить численность автомобилей в каждом из состояний и вероятности нахождения в них. Такие задачи решаются различными методами: статистического анализа, теории массового обслуживания, имитацион-

ного моделирования и др. Наиболее точную и достоверную оценку позволяет получить метод статистического анализа, так как он основан на базе существующей системы учета и оценок работы парка конкретного автотранспортного предприятия.

1.4.2. Оценка показателей надежности АП по статистическим данным

В реальных условиях эксплуатации автопарка количество автомобилей и продолжительность их пребывания в том или ином состоянии — величины случайные, зависящие от многих факторов. Однако, используя статистические данные результатов работы автотранспортного предприятия за определенный период времени, можно установить закономерности распределения этих случайных величин и характеристики надежности АП. Для этого методами математической статистики и теории вероятностей осуществляют переход от статистических характеристик к теоретическим.

Рассмотрим метод статистического анализа показателей надежности АП на примере.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за техническим состоянием автомобилей конкретного АТП в течение полугода были получены следующие статистические данные об их нахождении в различном технологическом состоянии (табл. 1.3).

Таблица 1.3. Статистические данные работы АП

Списочное количество автомобилей, $N_{\text{сп}}$	Количество автомобилей на линии, $N_{\text{л}}$	Простои автомобилей			
		ТО	ТР	ОТП	ОП
348	283	4	42	6	13
352	285	8	40	10	9
352	290	7	28	9	18
351	271	3	59	8	10
352	275	8	48	9	12
352	278	7	49	8	10
354	285	0	52	9	8

Окончание табл. 1.3

Списочное количество автомобилей, $N_{\text{сп}}$	Количество автомобилей на линии, $N_{\text{л}}$	Простои автомобилей			
		ТО	ТР	ОТП	ОП
354	285	5	49	9	6
354	289	5	46	9	5
354	279	5	53	10	7
354	283	3	53	7	8
354	286	6	47	7	8
354	289	4	43	7	11
354	289	1	44	6	13
354	279	2	52	8	14
354	289	4	48	7	6

На основе данных табл. 1.3 о списочном количестве, выпуске на линию, простоях по различным причинам построим граф состояний автомобиля (рис. 1.9).

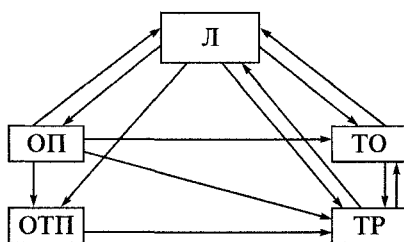


Рис. 1.9. Граф состояний автомобилей в АТП

Граф включает следующие состояния: работу на линии — Л; простои в техническом обслуживании — ТО; простои в текущем ремонте — ТР; простои по организационно-техническим причинам — ОТП; простои по организационным причинам — ОП.

Обобщенной характеристикой работы АП является вероятность пребывания автомобилей на линии. Для установившегося режима эксплуатации отношение математического ожидания числа автомобилей, соответствующего состоянию Л, к среднесписочному числу

автомобилей в АТП, принимается равным коэффициенту выпуска автомобилей на линию $\alpha_{\text{в}}$; отношение суммы математических ожиданий автомобилей с состояниями Л и ОП к среднесписочному числу автомобилей — коэффициенту технической готовности $\alpha_{\text{т}}$.

Результаты обработки статистических данных работы АП представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Числовые характеристики надежности АП

Характеристики надежности АП	Состояние				
	Работа на линии, $\bar{N}_{\text{л}}$	ТО	ТР	ОТП	ОП
1. Математическое ожидание количества автомобилей в $\bar{N}_j$ в j -м состоянии	283,44	4,5	47,13	8,06	9,87
2. Относительная величина математического ожидания $\bar{R}_j = \bar{N}_j / \bar{N}_{\text{сп}}$	0,803	0,013	0,133	0,023	0,028
3. Среднеквадратическое отклонение σ_j	5,632	2,366	7,060	1,289	3,481
4. Коэффициент вариации v_j	0,019	0,525	0,149	0,159	0,352

Анализ показателей надежности АП показывает, что коэффициент выпуска автомобилей на линию достаточно высокий ($\alpha_{\text{в}} = R_{\text{л}} = 0,803$) и стабильный ($v = 0,019$). Коэффициент технической готовности, учитывающий работу автомобилей на линии и их простои по организационным причинам, составил

$$\alpha_{\text{т}} = \bar{R}_{\text{л}} + \bar{R}_{\text{оп}} = 0,803 + 0,028 = 0,831.$$

Вопросы для самопроверки

1. Какие проблемы изучает наука о надежности машин?
2. Что понимается под «физикой» отказов машин?
3. На каких отраслях знаний базируется наука о надежности?
4. Как определяется оптимальный уровень надежности изделий?
5. Раскройте понятия качества и надежности машин.
6. Какие виды технических состояний составляют жизненный цикл автомобиля?

7. Приведите классификацию отказов автомобилей.
8. В чем состоит основное отличие постепенных отказов от внезапных?
9. Какими свойствами характеризуется надежность изделий?
10. Что понимается под безотказностью машин и какими показателями оценивается это свойство надежности?
11. Раскройте понятие долговечности изделий. Какие показатели служат для ее оценки?
12. Укажите взаимосвязь между вероятностью безотказной работы $P(t)$, вероятностью отказов $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$.
13. Что понимается под гамма-процентным ресурсом машины и как он определяется?
14. Что такое ремонтпригодность машин? Какие показатели служат для ее оценки?
15. Раскройте понятие сохраняемости машин. Какими показателями можно оценить это свойство надежности?
16. Какие показатели используются для комплексной оценки надежности изделий?
17. Какими показателями можно оценить надежность парка автомобилей?
18. Приведите методику оценки показателей надежности автопарка по статистическим данным.

Глава 2

ПРОЦЕССЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАШИН

При эксплуатации в машинах непрерывно протекают различные физическо-химические процессы, которые приводят к изменению начальных свойств и состояния материалов, из которых они изготовлены. Эти изменения и являются основной причиной возникновения повреждений и отказов отдельных конструктивных элементов и машины в целом.

Поэтому изучение закономерностей, описывающих процессы изменения свойств и состояния материалов в условиях эксплуатации, является основой для оценки надежности и ее обеспечения в требуемых пределах.

2.1. Процессы изменения начальных свойств изделий

Процессы, приводящие к изменению начальных свойств, протекают во всех материалах, из которых создано изделие, включая не только конструктивные элементы, но и все, которые участвуют в ее работе (смазка, топливо, охлаждающая жидкость и др.).

Основной причиной протекания таких процессов является то, что при работе машин на их узлы, агрегаты, конструктивные элементы воздействуют различные виды энергии, которые приводят к эксплуатационным повреждениям (износам, деформациям, поломкам, коррозии и др.). Это, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных параметров и, в конечном счете, приводит к потере изделием работоспособного состояния (отказу). В упрощенной форме схема этого процесса представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Схема формирования процесса реализации машиной работоспособности

Работа любой машины базируется на потреблении энергии, источниками которой служат:

- внутренняя энергия рабочих процессов, протекающих в машине, ее агрегатах и механизмах;
- потенциальная энергия, накопленная в материалах и элементах конструкции машины в процессе их изготовления (внутренние напряжения при отливке, штамповке, обработке деталей и т. д.);
- энергия окружающей среды, воздействующая на машину в процессе ее эксплуатации.

Часть этой энергии расходуется на совершение полезной работы, а часть вызывает в ее узлах и деталях различные физико-химические процессы (механические, тепловые, химические и электрические), влекущие изменение их начальных свойств и, как следствие, потерю работоспособности.

Механические процессы возникают в машине в результате преобразования потребляемых источников энергии и передаются по всем ее звеньям при осуществлении машиной заданных функций. Эти процессы воздействуют на конструктивные элементы машины в виде силовых нагрузок при взаимодействии с внешней средой. Характер возникающих нагрузок определяется режимом рабочего процесса, инерцией перемещающихся деталей, трением в кинематических парах и другими факторами, связанными со сложными физическими явлениями при работе машины.

Механические процессы могут возникать в машине и как следствие потенциальной энергии, накопленной ее конструктивными элементами в процессе изготовления.

Например, деформация детали может возникнуть в результате не только приложения силовой нагрузки, но и перераспределения внутренних напряжений при самопроизвольном переходе материала из неустойчивого состояния в устойчивое.

При движении сопряженных деталей, находящихся под воздействием силовых механических нагрузок, в зонах их контакта возникает сопротивление перемещению — **трение**.

Результатом взаимодействия сопряженных деталей при трении является их изнашивание, проявляющееся в виде отделения или деформации материала.

Изнашивание является одной из основных причин возникновения отказов и наиболее характерным видом повреждения большинства деталей машин и механизмов. Статистические данные показывают: для ряда транспортных и дорожных машин отказы из-за изнашивания рабочих поверхностей достигают от 50 до 80 % всех отказов, возникающих в процессе эксплуатации.

Упрощенная схема воздействия внутренних сил на элемент конструкции при таком виде силового нагружения представлена на рис. 2.2. При скольжении одной детали относительно другой возникает механическое взаимодействие вершин микронеровностей контактирующих поверхностей, в результате чего наблюдается их упругое или пластическое деформирование. Сила сопротивления скольжению, обусловленная, в основном этими деформациями неровностей, называют **силой трения**.

Величина силы трения P_t зависит от характера взаимодействия поверхностей сопряженных деталей в зонах контакта. При сухом тре-

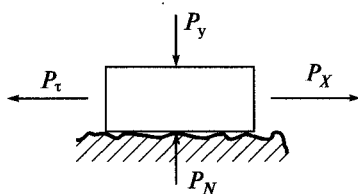


Рис. 2.2. Схема взаимодействия поверхностей при их относительном перемещении: P_t — сила трения; P_y — нормальная сила (сила прижатия); P_x — осевая сила перемещения; P_N — нормальная сила реакции силового нагружения

нии, например, она определяется по известной формуле Амонтона — Кулона:

$$P_{\tau} = f \cdot P_N, \quad (2.1)$$

где f — коэффициент сухого трения, величина которого зависит от материалов деталей сопряжения и других конструктивных и эксплуатационных факторов; P_N — нормальная сила реакции силового нагружения, действующая перпендикулярно поверхности трения.

Тепловые процессы возникают в конструктивных элементах машины при больших температурных воздействиях. Это характерно, например, для деталей двигателя внутреннего сгорания, который является основным источником механической энергии транспортных средств. Температура газов в камере сгорания топлива современных двигателей в момент воспламенения смеси достигает 2500°C и около 20—25 % выделяющейся при этом энергии расходуется на нагрев деталей. Детали газораспределительного механизма, головка блока цилиндров, поршни и другие детали двигателя испытывают при этом высокие тепловые нагрузки.

Чаще всего температурные напряжения обусловлены неравномерным нагреванием элемента конструкции, в результате чего более нагретые слои детали, расширяясь, испытывают сжимающие усилия из-за того, что более холодные слои препятствуют этому.

При тепловом воздействии на конструктивные элементы, работающие в условиях ограничения деформирования, в них возникают температурные напряжения. Механизм образования такого вида напряжения представлен на рис. 2.3.

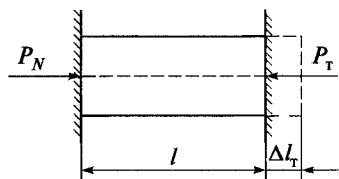


Рис. 2.3. Схема возникновения температурного напряжения детали

В случае когда конструктивный элемент свободен (не ограничен возможностью деформирования), при нагревании в результате тепловой деформации он удлинился бы на величину

$$\Delta L_T = k_T \Delta T l, \quad (2.2)$$

где k_t — коэффициент линейного расширения материала конструктивного элемента; ΔT — перепад температур при нагревании; l — первоначальная длина конструктивного элемента.

При ограничении деформирования сечение конструктивного элемента не имеет возможности перемещаться. Ограничение перемещения равносильно тому, что к элементу приложили сжимающее усилие P_t , которое сжало бы его на величину Δl_t . Однако в связи с невозможностью перемещаться ни вправо, ни влево перемещение $\Delta l_t = 0$.

Возникающее в результате теплового воздействия напряжение σ_n определяется из выражения

$$\sigma_n = k_t E \Delta T, \quad (2.3)$$

где E — модуль продольной упругости материала элемента.

Таким образом, температурные напряжения, возникающие при тепловом воздействии, зависят от характера температурного поля в элементе конструкции, коэффициента температурного линейного расширения материала элемента k_t и модуля продольной упругости E .

Химические процессы наблюдаются при взаимодействии материалов конструктивных элементов машин с агрессивными компонентами внешней среды (влагой, температурой окружающего воздуха, химически активными компонентами и др.). Такое взаимодействие вызывает коррозионное разрушение, характерное для большого количества металлических деталей машин.

Основной причиной общего агрессивного воздействия среды на конструктивные элементы машины в эксплуатации является загрязнение воздуха и, как следствие, атмосферных осадков. Атмосферные осадки, содержащие в своем составе кислоту, становятся еще более кислыми от попадания в атмосферу оксидов азота и серы, образующихся в огромных объемах при сгорании различных источников энергии.

Химические процессы возникают и в химически активных газовых средах при сгорании топливно-воздушной смеси двигателя внутреннего сгорания. В качестве агрессивных компонентов газовой среды выступают соединения кислорода, серы, хлора, азота.

Электрические процессы возникают прежде всего в машинах, оборудованных электрическими и электронными системами управления их работой. Работоспособность, например, автомобилей невозможна без электрического тока, источником которого является аккумуляторная батарея, а для ее постоянной зарядки и питания всех потреби-

телей электрической энергии при движении служит генератор. При этом необходимая мощность источников электрического тока на современных автомобилях достигает 2 кВт, а напряжение — 36 В.

Возникающие в результате действия электрической энергии повреждения связаны прежде всего с электроэрозионным изнашиванием различного рода электрических контактов (в электродах свечей зажигания, реле, прерывателях, стартерах, генераторах). Разрушение поверхностей контактов происходит вследствие переноса ионов материала с одного из них на другой, а также искрения и дугообразования с выделением большого количества тепловой энергии в зазор между контактами, что приводит к испарению или разбрызгиванию металла на контактирующие поверхности.

Повреждения, возникающие в результате действия того или иного вида энергии, часто проявляются не сразу — не в начале ввода изделия в эксплуатацию. Существует так называемый период «накопления воздействий», прежде чем возникнут признаки внешнего проявления эксплуатационного повреждения, характер которого зависит от вызывающего его физического процесса. Это относится, например, к процессу усталостного разрушения, для начала развития которого (появления усталостной трещины) необходимо определенное число циклов переменных напряжений.

В процессе эксплуатации детали машин испытывают различные по характеру и величине нагрузки, обусловленные теми процессами, которые воздействуют на них. Механические процессы, действующие, например, в сопряжениях шейка вала—подшипник, цилиндр—поршень приводят к их изнашиванию. Химические и электрохимические процессы вызывают коррозионное разрушение материалов конструктивных элементов. Коррозионные повреждения характерны для таких элементов автомобилей, как кузова и кабины автомобилей, топливные баки, конструктивные элементы систем выпуска отработавших газов. Знакопеременные механические нагрузки, действующие на рамы, валы, оси, рессоры и другие конструктивные элементы автомобилей, приводят к их усталостному разрушению.

В реальных условиях эксплуатации вследствие постоянных изменений нагрузок, скоростей, температурных колебаний, степени загрязнения окружающей среды на конструктивные элементы машины одновременно может воздействовать несколько различных негативных процессов, вызывающих потерю ими работоспособности. Типичным примером могут служить механические, тепловые и

химические процессы повреждения деталей кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов двигателей внутреннего сгорания.

2.2. Эксплуатационное нагружение деталей машин

При исследовании причин отказов деталей машин необходимо прежде всего проанализировать действующие на них в процессе эксплуатации нагрузки, закономерности их изменения во времени и режимы нагружения.

Под **нагружением** понимается процесс воздействия нагрузок на конструктивные элементы машины в процессе эксплуатации. Если на изделие действует нагрузка или несколько нагрузок одновременно, считается, что оно нагружено, т. е. функционирует под нагружением. Для деталей машин наиболее типичными видами нагружения являются: силовое, в том числе и обусловленное трением сопряженных деталей; тепловое; коррозионное и электрическое, возникающее под действием электрического тока.

Под **силовой нагрузкой** понимают воздействие в процессе эксплуатации на конструктивный элемент внешней сосредоточенной или распределенной силы, которая вызывает в материале соответствующее противодействие (внутренние силы сопротивления). В число внешних сил входят и силы реакции связей, которые обеспечивают равновесное состояние системы. Внешним проявлением силового нагружения в зависимости от характера прилагаемого воздействия является изменение формы детали, т. е. ее деформация (растяжение, изгиб, кручение и др.).

Количественной оценкой силового нагружения служит **напряжение нагружения**, величина которого определяется отношением внутренних сил, возникающих в сечении элемента, к площади этого сечения

$$\sigma_n = \frac{P_v}{F}, \quad (2.4)$$

где P_v — внутренняя сила сопротивления в сечении элемента конструкции; F — площадь сечения элемента.

Таким образом, как следует из приведенной формулы, величина расчетного напряжения зависит не от материала детали, а только от действующих на нее нагрузок и размеров поперечного сечения.

Напряжение измеряется в единицах силы, отнесенных к единице площади. В Международной системе единиц (СИ) за единицу напряжения принят *паскаль* (Па) — напряжение, при котором на площадь сечения $F = 1 \text{ м}^2$ действует внутренняя сила P_v , равная 1 ньютону (Н). В связи с тем, что эта единица измерения является весьма малой величиной, чаще при расчетах используется мегаласкаль ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$).

В зависимости от характера изменения этих сил во времени различают два режима силового нагружения элементов конструкций: статический и динамический [30].

При **статическом режиме** элементы конструкции работают в таких условиях, когда действующая на них эксплуатационная нагрузка не изменяется во времени. При таком режиме напряжение нагружения сохраняется постоянным во времени и определяется по формуле

$$\sigma_n = \varphi_d \cdot \frac{\bar{P}}{F}, \quad (2.5)$$

где φ_d — коэффициент деформации, зависящий от схемы силовой нагрузки и формы поперечного сечения детали; $\bar{P}$ — математическое ожидание внешней силы, действующей на деталь; F — площадь поперечного сечения детали.

Разновидностью статистического нагружения является *контактное нагружение*, когда усилие от одной детали конструкции передается другой по бесконечно малой по сравнению с размерами этих деталей площадке контакта (рис. 2.4).

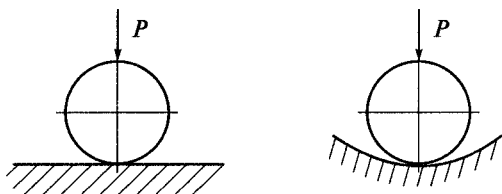


Рис. 2.4. Примеры силового контактного нагружения

Возникающее при этом напряжение называют *контактным напряжением*, величина которого зависит от внешней силы P , упругих свойств материалов элементов конструкции, а также формы и размеров контактирующих поверхностей. Максимальная величина напряжения при таком виде нагружения наблюдается в точке контакта.

При **динамическом режиме нагружения** действующая на конструктивный элемент нагрузка изменяется во времени. Такой вид нагружения обусловлен следующими основными причинами:

- колебательным характером механических процессов при работе двигателей, гидравлических насосов, компрессоров и т. д.;
- динамическим характером работы транспортных машин (трогание с места, разгон, торможение, остановка);
- неблагоприятными дорожными условиями, вызывающими динамические нагрузки на агрегаты, механизмы, конструктивные элементы машин;
- возникновением вибрационных нагрузок, возрастающих с ухудшением технического состояния машин в процессе эксплуатации и др.

При динамическом режиме напряжение нагружения определяется выражением

$$\sigma_n(t) = \varphi_d \cdot \frac{P(t)}{F(t)}, \quad (2.6)$$

где $P(t)$, $F(t)$ — значение нагружающей силы и площадь поперечного сечения конструктивного элемента, изменяющиеся во времени.

Таким образом, в отличие от статического, напряжение при динамическом режиме нагружения $\sigma_n(t)$ является функцией времени эксплуатации изделия. При этом изменяется не только величина нагружения, но и площадь поперечного сечения детали, которая происходит из-за изнашивания, коррозионного разрушения металла и других факторов.

Различают два вида динамического нагружения: ударное и циклическое (колебательное).

Под **ударом** понимается механическое взаимодействие элементов конструкции, приводящее к изменению скоростей их точек соприкосновения за бесконечно малый промежуток времени. Этот промежуток времени, измеряемый в тысячных, а иногда и миллионных долях секунды, называется *временем удара*. В воспринимающем такую нагрузку элементе кинетическая энергия практически мгновенно превращается в динамическую, вызывая деформацию этого элемента или его разрушение.

Примером ударного нагружения является попадание колеса автомобиля в глубокую выемку на дороге, что приводит к повреждению рессоры. Ударные нагрузки возникают в зацеплениях зубчатых колес

вследствие их изнашивания в процессе эксплуатации; пружинах клапанов газораспределительного механизма двигателей и других деталях машин, работающих в условиях высоких динамических нагрузок.

Если внешнюю нагрузку P на деталь (пружину, например) приложить статически, то перемещение конструктивного элемента $\Delta l_{\text{ст}}$ определяется из выражения

$$\Delta l_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} / j, \quad (2.7)$$

где j — жесткость пружины, т. е. сила, вызывающая смещение верхнего конца пружины на единицу длины.

При ударном воздействии на деталь сила $P_{\text{д}}$, с которой твердое тело ударяет по элементу конструкции, называется ударной нагрузкой. Величина этой нагрузки определяется из выражения

$$P_{\text{д}} = k_{\text{д}} \cdot P_{\text{ст}}, \quad (2.8)$$

где $k_{\text{д}}$ — коэффициент ударной динамичности.

Коэффициент $k_{\text{д}}$ показывает, во сколько раз ударная нагрузка $P_{\text{д}}$ больше, чем при ее статистическом приложении $P_{\text{ст}}$ (рис. 2.5).

Его значение находят по формуле

$$k_{\text{д}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta l_{\text{ст}}}}, \quad (2.9)$$

где h — расстояние между прилагаемой нагрузкой и деталью; $\Delta l_{\text{ст}}$, $\Delta l_{\text{д}}$ — деформации детали при статическом и динамическом нагружении.

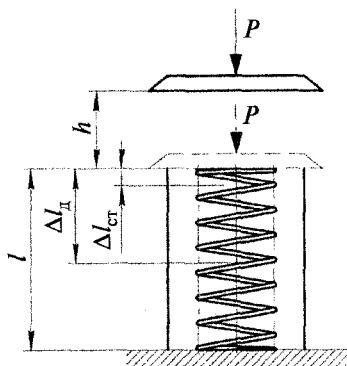


Рис. 2.5. Схема ударного эксплуатационного нагружения

На основании закона Гука перемещение Δl_d , вызванное в элементе динамической нагрузкой, также в k_d раз превышает перемещение $\Delta l_{ст}$, вызванного статистическим приложением такой же нагрузки

$$\Delta l_d = k_d \Delta l_{ст}. \quad (2.10)$$

Циклическим (колебательным) режимом нагружения называется такое воздействие на элемент конструкции, при котором изменение силовой нагрузки носит циклический (периодический) характер (рис. 2.6).

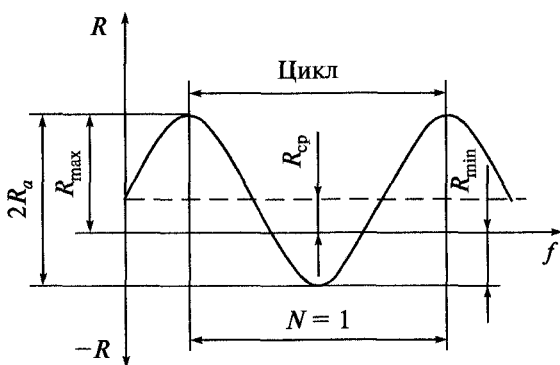


Рис. 2.6. Схема циклического нагружения:

$R_{\max}$, $R_{\min}$ — максимальная и минимальная амплитуды нагрузки в цикле;
 R_{cp} — средняя амплитуда нагрузки в цикле; R_a — амплитуда цикла нагружения

Циклический режим нагружения характеризуется следующими параметрами: циклом, амплитудой, размахом, частотой, коэффициентом асимметрии, средней амплитудой (средней нагрузкой).

Под *циклом нагружения* понимается однократная смена нагрузок за один период их изменения ($N = 1$).

Амплитуда цикла R_a представляет собой алгебраическую полуразность максимального $R_{\max}$ и минимального $R_{\min}$ значений нагрузки цикла

$$R_a = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2}. \quad (2.11)$$

Размахом цикла называют удвоенную амплитуду его колебаний

$$2R_a = R_{\max} + R_{\min}. \quad (2.12)$$

Число циклов (колебаний) нагружения N в единицу времени t представляет собой *частоту цикла*

$$f_{\text{ц}} = N / t. \quad (2.13)$$

Под *коэффициентом асимметрии цикла* понимается отношение минимального значения нагрузки к максимальному

$$r = R_{\min} / R_{\max}. \quad (2.14)$$

Средняя амплитуда (нагрузка) цикла определяется выражением

$$R_{\text{ср}} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2}. \quad (2.15)$$

2.3. Причины нарушения работоспособности машин

Эксплуатационные нагружения, воздействуя на элементы конструкции машин, приводят к различным видам повреждений. В начальный период эксплуатации энергия сопротивления материала превышает эксплуатационное нагружение, действующее на конструктивный элемент, поэтому он находится в работоспособном состоянии. С увеличением наработки из-за необратимых изменений в механизмах эксплуатационные нагрузки возрастают. Одновременно происходит накопление внутренних повреждений в материале детали. И в определенный момент времени, когда энергия эксплуатационного нагружения превысит энергию сопротивления материала, элемент конструкции потеряет работоспособность и не сможет выполнять свое функциональное назначение.

В зависимости от вида нагружения в деталях машин возникают различные виды эксплуатационных повреждений (усталость металла,

Таблица 2.1. Основные причины потери автомобилем работоспособности

Наименование эксплуатационного повреждения	Процентное распределение
Изнашивание под воздействием сил трения	45—50
Пластическое (остаточное) деформирование	25—30
Усталостное разрушение	15—20
Коррозионное разрушение и старение	5—10

остаточные деформации, старение, коррозия, изнашивание). Для автотранспортных средств и их конструктивных элементов процентное распределение этих повреждений приведено в табл. 2.1 [6].

2.3.1. Трение и изнашивание деталей

Основной причиной нарушения работоспособности машин являются изменения, возникающие в материалах деталей вследствие трения и изнашивания их поверхностей. Статистические данные показывают, что из-за изнашивания деталей под влиянием сил трения происходит до 50 % отказов машин, находящихся в эксплуатации.

Основные понятия о трении

Трением называют явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

Изучением процессов трения и изнашивания механических систем, сопряжений, узлов и деталей машин занимаются *трибология* и *триботехника*.

Трибология — это наука о трении, изнашивании, смазке и взаимодействии контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении.

Триботехника — это прикладной раздел трибологии, связанный с расчетом, проектированием, изготовлением, испытанием, эксплуатацией и ремонтом узлов трения механизмов и машин.

При анализе изнашивания механических систем в зависимости от наличия и характера движения различают:

- *трение покоя* — трение двух тел до их перехода к относительно-му движению;
- *трение движения* — трение двух тел, находящихся в относительно-ном движении;

По характеру относительного движения трение подразделяется на трение скольжения (трение первого рода), трение качения (трение второго рода) и трение качения с проскальзыванием (трение третьего рода).

Согласно ГОСТ 27674—88 *трением скольжения* называется трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по величине и (или) направлению.

К *трению качения* относится трение движения твердых тел, при котором их скорости в точках качения одинаковы по величине и направлению.

Основными количественными показателями, оценивающими процесс трения, являются сила трения и коэффициент трения.

Сила трения — это сила сопротивления перемещению одного тела по поверхности другого под воздействием внешней силы. Эта сила зависит прежде всего от нормальной силы, которая прижимает одну поверхность контактирующих деталей к другой.

При недостаточной осевой силе тело остается в состоянии покоя, так как не может преодолеть силу трения скольжения. Для перехода от состояния покоя к движению необходимо, чтобы осевая сила P_x несколько превысила силу трения P_τ (рис. 2.7). Максимальное значение силы трения, преодолев которое подвижный элемент начинает скольжение, называется *силой трения покоя* $P_{\text{тп}}$. Далее при установившейся нормальной силе прижатия сила трения скольжения несколько меньше силы трения покоя и остается постоянной во времени ($P_\tau = \text{const}$).

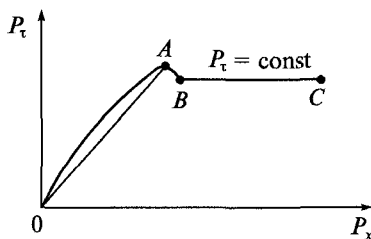


Рис. 2.7. Схема изменения силы трения P_τ при переходе от состояния покоя к движению:

0A — состояние покоя; AB — переход от состояния покоя к движению; BC — движение

Коэффициент трения скольжения представляет собой отношение силы трения к нормальной составляющей внешних сил, прижимающих контактирующие поверхности друг к другу ($f = P_\tau / P_N$). Коэффициент трения, величина которого зависит от шероховатости поверхностей, скорости их относительного перемещения, физико-механических свойств материалов, температуры в зоне трения, служит характеристикой сложности процессов, протекающих в узле трения. Из схемы видно, что коэффициент трения равен тангенсу угла накло-

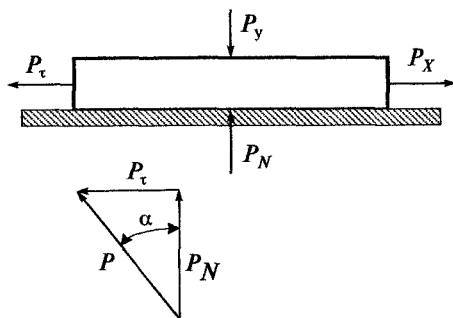


Рис. 2.8. Схема действия сил при трении скольжения

на результирующей силы P и нормальной силы нагружения P_N , т. е. $f = \tan \alpha$ (рис. 2.8).

Современное представление о природе трения учитывает не только механическое, но и молекулярное взаимодействие поверхностей трения. В результате возникает сопротивление относительному скольжению, называемое *молекулярной составляющей силы трения*. Эта составляющая характеризует атомно-молекулярные взаимодействия контактирующих поверхностей при их сближении и относительном перемещении. В технической литературе она носит название *адгезионной составляющей силы трения*. Под термином «адгезия» понимается взаимное притяжение поверхностей, возникающее в результате атомно-молекулярного взаимодействия.

Величина молекулярной составляющей силы трения зависит от механических характеристик материалов деталей сопряжения, качества рабочих поверхностей, зазора между ними, наличия окисных пленок в зоне контакта.

Таким образом, сила трения скольжения может быть представлена как сумма молекулярной (адгезионной) и механической составляющих

$$P_{\tau} = pF_k + \beta P_N, \quad (2.16)$$

где p — средняя интенсивность молекулярной составляющей силы трения; F_k — фактическая площадь контакта поверхностей; β — коэффициент, учитывающий механическую составляющую силы трения; P_N — нормальная сила давления на поверхность трения.

В сопряжениях, изнашивание которых происходит в условиях трения качения (рис. 2.9), сила трения P_k зависит от нормальной со-

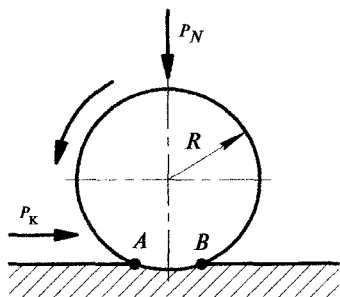


Рис. 2.9. Схема контакта рабочих поверхностей при трении качения

ставляющей внешних сил P_N , коэффициента трения качения f_k и радиуса цилиндра R

$$P_k = f_k \cdot P_N / R. \quad (2.17)$$

Наличие трения качения объясняется проскальзываем контактирующих поверхностей. При взаимодействии материал цилиндра на участке $A-B$ сжимается, а на плоскости вследствие упруго-пластических деформаций растягивается. В результате, цилиндр при каждом обороте проходит большее расстояние, чем длина его окружности, поэтому наряду с чистым качением поверхностей происходит их относительное скольжение. Такой вид трения характерен, например, для шариковых и роликовых подшипников качения.

Физическая сущность изнашивания

Под воздействием сил трения рабочие поверхности конструктивных элементов машин подвергаются изнашиванию.

Изнашивание — процесс разрушения и отделения материала поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. Физическая сущность изнашивания заключается в том, что при относительно перемещении двух поверхностей в области их контакта возникают механические и молекулярные связи, сопровождающиеся тепловыми, окислительными и другими эффектами. Возникновение таких связей и последующий их разрыв приводят к разрушению микрообъемов поверхности и их удалению, т. е. к изнашиванию.

Процесс изнашивания сопровождается изменением геометрических размеров и форм деталей, увеличением зазоров и люфтов раз-

личных сопряжений. В свою очередь, это приводит к возникновению вибраций и повышенных шумов в механизмах, ударных нагрузок, потере герметичности, сопровождаемой утечкой рабочих жидкостей и газов (цилиндр—поршень двигателя, коренные шейки коленчатого вала — вкладыши подшипников, пневматическая и гидравлическая аппаратура и др.).

Современное представление о природе изнашивания базируется на хорошо изученном факте дискретности контакта шероховатых тел, в соответствии с которым фактическая площадь контакта металлических поверхностей при умеренных давлениях составляет не более 0,1—1,0 % номинальной площади. Дискретный характер касания, наличие большого числа пятен контакта и, соответственно, фрикционных связей является следствием того, что реальные поверхности деталей имеют сложный рельеф, который характеризуется шероховатостью и волнистостью.

Размеры пятен контакта поверхностей металлических деталей, образующихся вследствие деформации микронеровностей, очень малы и не превышают 30—50 мкм. Фактическая площадь контакта рабочих поверхностей может быть определена как сумма площадей соприкосновения микронеровностей

$$F_k = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (2.18)$$

где F_i — площадь i -го пятна контакта; n — число точек контакта.

Фактическая площадь контакта рабочих поверхностей зависит от параметров их профилей, физико-механических характеристик материалов деталей сопряжения (твердости, предела текучести, модуля упругости), а также нормальной нагрузки на поверхности трения.

Чем выше твердость поверхностей деталей, тем меньше фактическая площадь контакта. При взаимодействии металлических деталей с соизмеримой твердостью происходит постепенное сближение поверхностей, сопровождаемое появлением новых пятен контактирования. В случае контакта деталей, твердость которых различается существенно, сближение происходит главным образом за счет смятия микронеровностей менее твердых поверхностей и внедрения в нее выступов шероховатостей более твердых поверхностей.

Существенное влияние на фактическую площадь контакта оказывает нормальная нагрузка, действующая на рабочую поверхность де-

тии. С увеличением нагрузки P_N из-за смятия микронеровностей сопряженных поверхностей фактическая площадь их контакта увеличивается. При этом площадь контакта для деталей с более твердой поверхностью увеличивается в меньшей степени по сравнению с деталями с менее твердой поверхностью (рис. 2.10).

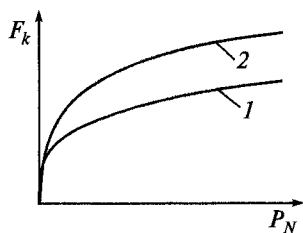


Рис. 2.10. Зависимость фактической площади контакта F_k от нагрузки P_N для деталей с различной поверхностной твердостью:

1 — с твердостью HB_1 ; 2 — с твердостью HB_2 ($HB_1 > HB_2$)

В процессе изнашивания исходный (технологический) рельеф поверхности детали преобразуется в эксплуатационный (рис. 2.11). При этом устанавливается та шероховатость поверхности, которая соответствует данному процессу разрушения поверхностных слоев в период нормального изнашивания.

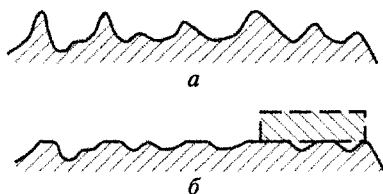


Рис. 2.11. Схема преобразования технологического рельефа поверхности (а) в эксплуатационный (б)

Основное влияние на процесс изнашивания оказывают постоянно возникающие и разрушающиеся фрикционные связи, имеющие молекулярно-механическую природу. В соответствии с ней при относительном перемещении рабочих поверхностей возникает два вида взаимодействия: механическое и молекулярное.

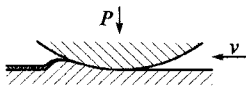
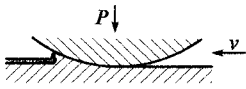
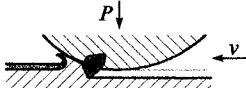
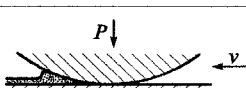
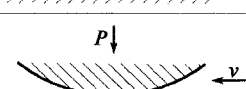
Механическое взаимодействие возникает при контакте микровыступов перемещающихся друг относительно друга поверхностей, в ре-

зультате чего происходит их механическое сцепление. В зависимости от характера такого взаимодействия наблюдается упругая или пластическая деформация (оттеснение материала), а также микрорезание микровыступами более твердой поверхности менее твердой.

На участках контактирующих поверхностей при трении, кроме механического, возникает и взаимодействие микронеровностей на молекулярном уровне. В результате молекулярного взаимодействия (адгезии) наблюдается схватывание или окисных пленок, покрывающих трущиеся поверхности, или микронеровностей основного металла.

В соответствии с исследованиями И.В. Крагельского в зависимости от характера взаимодействия материалов, соотношения механической и молекулярной составляющих трения различают пять основных видов деформирования и разрушения деталей при изнашивании (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Виды деформирования и разрушения деталей при изнашивании

Схема взаимодействия материалов	Характер разрушения
	Упругое оттеснение материала (упругая деформация)
	Пластическое оттеснение материала (пластическая деформация)
	Микрорезание материала внедрившимися твердыми частицами
	Разрушение окисных пленок контактирующих поверхностей
	Разрушение основного материала в результате молекулярного взаимодействия поверхностей

В основе фундаментального изучения изнашивания деталей машин лежит положение о ведущих и сопутствующих процессах разрушения. Основным процессом, возникающим при трении материалов

и вызывающим износ деталей, является упругопластическая деформация, возникающая в результате взаимодействия микронеровностей поверхностей. Однако этот процесс сопровождается целой гаммой сопутствующих процессов (физических, химических и механических), протекающих в поверхностных слоях трущихся тел. К ним прежде всего относятся процессы окисления, усталостного разрушения, трибофизические и коррозионно-механические процессы и др.

Основные и сопутствующие процессы изнашивания

При **нормальном изнашивании** разрушение поверхности при трении локализуется в тончайших поверхностных слоях вторичных структур в условиях динамического равновесия механического процесса их образования и разрушения.

При **окислительном изнашивании** происходит взаимодействие активных, пластически деформированных поверхностных слоев металла с атомами кислорода воздуха или смазки, адсорбированных на поверхности. Образованные при этом на поверхности пленки твердых растворов и химических соединений металла с кислородом (вторичные структуры) в процессе трения разрушаются и удаляются из зоны контакта. Таким образом, при нормальном окислительном изнашивании постоянно происходит процесс образования и разрушения тончайших пленок вторичных структур.

Нормальное окислительное изнашивание возникает при трении скольжения и качения в условиях работы сопряжений без смазки или граничной смазки исключительно в *стационарной* зоне. В таких условиях интенсивность изнашивания примерно одинакова и минимальна по сравнению с ее значениями вне зоны.

Одной из основных причин разрушения поверхностных слоев деталей является развитие в них усталостных трещин. Эти трещины возникают в результате многократного деформирования микровыступов материала поверхности детали под действием сжимающих и растягивающих напряжений в зоне пятна контакта. При достижении определенного (критического) числа циклов воздействия нагрузки, соответствующего пределу усталости материала, происходит разрушение поверхности детали, которое называют **усталостным изнашиванием**.

Усталостное изнашивание наблюдается в большинстве сопряжений машин в качестве сопутствующего вида изнашивания как при трении качения, так и при трении скольжения.

В абразивной среде в процессе трения наблюдаются скольжение абразивных частиц, их внедрение в материал детали в местах контакта трущихся поверхностей, снятие тончайших слоев металла (микрорезание), многократно изменяющееся деформирование, коррозионно-механическое истирание.

Микрорезание возникает, когда твердость абразивных частиц значительно выше твердости металла. В этом случае относительная износостойкость материала пропорциональна ее твердости. Абразивные частицы способствуют разрушению окисных пленок на рабочей поверхности детали, после чего на чистом металле под воздействием внешней среды образуются новые окисные пленки, и процесс разрушения повторяется.

При микрорезании и пластическом деформировании образуются царапины, на дне которых в результате наклепа и образования новых твердых фаз происходит упрочнение металла. Следует избегать процесса изнашивания, когда возникает микрорезание материала, которое интенсифицирует процесс разрушения поверхности детали и снижает ее долговечность.

При трении скольжения с небольшими скоростями относительного перемещения поверхностей ($0,005\text{--}0,2$ м/с) и удельными нагрузками, превышающими предел текучести, при отсутствии разделяющего слоя смазки и защитной окисной пленки в местах контакта возникает специфический вид изнашивания — **схватывание I рода**.

Процесс изнашивания при схватывании I рода сопровождается появлением локальных металлических связей, незначительным повышением температуры, интенсивным пластическим деформированием и разрушением микронеровностей. Пластическое деформирование в этих условиях вызывает изменение состояния поверхности, разрушение окисных пленок и адсорбированных пленок смазки. При этом наблюдается интенсивное изнашивание, возрастающее с увеличением удельного нагружения на поверхности трения.

Схватывание I рода является одним из наиболее опасных видов повреждений деталей машин. Такой вид изнашивания при эксплуатации машин совершенно недопустим.

При высоких скоростях относительного скольжения поверхностей и повышенных давлениях с предшествующей десорбцией смазки развивается другой вид недопустимого изнашивания — **схватывание II рода**. При этом виде изнашивания возникают местные металлические связи, сопровождаемые деформациями, разрушениями в виде

трещин, выделением большого количества тепла. Высокие локальные температуры могут достигать значений, вызывающих изменение структуры металла, повышение его хрупкости. Одновременно происходит молекулярное взаимодействие поверхностей, заключающееся в сращивании отдельных участков контакта микронеровностей и переносе частиц металла с одной поверхности на другую.

Способность материала сопротивляться разрушению поверхности детали при трении называется **износостойкостью** — величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания. Износостойкость материала зависит от большого числа факторов конструирования, производства и эксплуатации изделия. Важнейшим из них является структурное состояние материала, которое формируется на стадии их производства и характеризуется совокупностью таких свойств, как:

- физико-механические (высокая сопротивляемость сжатию, растяжению и изгибу, достаточная твердость и вязкость при отсутствии хрупкости и др.);
- физические (большая теплопроводность, соизмеримые температурные коэффициенты расширения фаз и т. д.);
- физико-химические (химическая стабильность, устойчивость против коррозионных разрушений, достаточная насыщенность сплавов легирующими элементами и др.).

2.3.2. Пластическая деформация

Деформацией называется изменение формы и размеров детали под воздействием внешних сил (силового нагружения). Различают два вида деформации: упругую и пластическую.

Упругой деформацией называют деформацию, которая исчезает одновременно со снятием нагрузки или несколько позже в период «разгрузки» материала. Упругая деформация не вызывает заметных изменений в структуре и свойствах материала, так как под действием приложенной нагрузки возникает лишь незначительное смещение атомов из положения равновесия. После снятия силового нагружения смещенные атомы возвращаются в исходное равновесное состояние, и тело приобретает свою исходную форму и размеры.

Пластическая деформация представляет собой необратимое изменение формы и размеров детали после снятия нагрузки. Такая деформация возникает с увеличением нагрузки на конструктивный эле-

мент, когда в металле появляются сдвиги одних микрообъемов относительно других. Эти сдвиги необратимы, и после снятия нагрузки деталь изменяет свою форму и размеры. Возникает некоторое формоизменение, которое носит название *пластического*, или *остаточного деформирования*.

При деформировании в материале детали возникают внутренние силы, противодействующие этому процессу. Способность материала детали выдерживать внешние силовые нагрузки без разрушения называют *прочностью*, а ее количественной мерой служит *напряжение прочности*. При этом различают:

- нормальное напряжение прочности $\sigma_n = P/F$;
- касательное напряжение прочности $\tau_n = P_s/F_s$.

Нормальное напряжения противодействуют отрыву отдельных частей материала детали, а касательное — сдвигу этих частей относительно друг от друга.

В зависимости от схемы силового нагружения в конструктивных элементах машин возникают следующие виды деформаций: растяжение (сжатие), сдвиг (срез), изгиб и кручение. В табл. 2.3 приведены схемы нагружения деталей, вызывающие тот или иной вид деформации материала, параметры нагружения и расчетные формулы для определения возникающих напряжений [30].

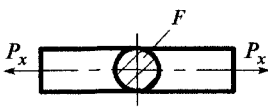
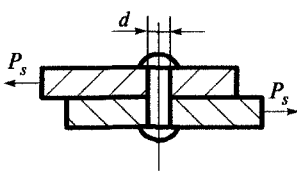
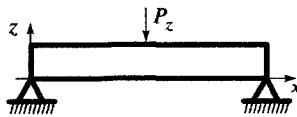
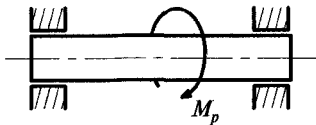
При эксплуатации машин подобные виды нагружений в чистом виде встречаются редко. В большинстве случаев материал конструктивного элемента подвергается сложному нагружению (изгибу с растяжением, изгибу с кручением, изгибу со сжатием и т. д.). Изгибу и кручению подвержены, например, валы, торсионы, пружины, рессоры и другие конструктивные элементы автомобилей, работающие в условиях высоких напряжений материала.

У такой сложной детали, как блок цилиндров двигателя, остаточные деформации приводят к изменению положения осей посадочных отверстий под гильзы, под вкладыши коренных подшипников коленчатого вала, обработанных поверхностей относительно технологических баз, что существенно снижает долговечность двигателя в целом.

Для коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания характерны деформации скручивания с нарушением расположения кривошипов, а также изгиб, в результате которого возникает торцевое биение фланца маховика.

При таких сложных видах нагружения для определения суммарного напряжения на конструктивный элемент используют принцип

Таблица 2.3. Классификация основных видов деформаций деталей

Вид деформации	Схема нагружения	Параметр нагружения	Напряжение нагружения
Растяжение (сжатие)		Осевая сила P_x	$\sigma_n = \frac{P_x}{F}$
Сдвиг (срез)		Поперечная сила P_s	$\tau_n = \frac{P_s}{F_s}$
Изгиб		Изгибающий момент M_x	$\sigma_n = \frac{M_x}{W_x}$
Кручение		Крутящий момент M_p	$\sigma_n = \frac{M_p}{W_p}$

независимости действия сил. В соответствии с ним деформации, возникающие от действия одной из приложенных к элементу нагрузок, не влияют на результаты действия остальных нагрузок. Суммарное напряжение нагружения от действия нагрузок тогда составит

$$\sigma_n = \sum_{i=1}^n \sigma_{ni}, \quad (2.19)$$

где σ_{ni} — напряжение от действия i -й нагрузки; n — число видов нагружений.

Сдвигу (срезу) подвергаются детали, работающие в условиях значительных нагрузок и при отсутствии относительного перемещения контактирующих поверхностей. Такие виды разрушения возникают в шпоночных, шлицевых и резьбовых соединениях, упорах, штифтах и других деталях машин.

Графически изменение деформации Δl в зависимости от прикладываемой нагрузки может быть представлено диаграммой (рис. 2.12). При приложении нагрузки до определенного значения (точка A) материал детали деформируется упруго, т. е. если нагрузка снимается, деформация исчезает. Максимальная нагрузка, при которой материал детали не перешел еще в стадию пластического деформирования (на диаграмме она обозначена точкой A), соответствует пределу упругости.

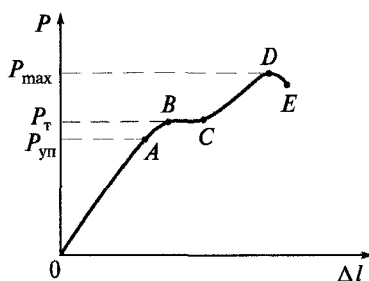


Рис. 2.12. Диаграмма зависимости «деформация—нагрузка»

Предел упругости — это максимальное напряжение, до которого материал детали деформируется упруго, т. е. напряжение, при котором остаточная деформация практически отсутствует:

$$\sigma_{\text{уп}} = P_{\text{уп}} / F, \quad (2.20)$$

где F — площадь поперечного сечения элемента конструкции.

Последующее повышение нагрузки приводит к тому, что в металле появляются единичные сдвиги, т. е. возникает пластическая деформация. Деформация происходит при постоянной нагрузке на участке BC диаграммы, который называется *площадкой текучести*. Нагрузка P_T , при которой начинается пластическая деформация, соответствует пределу текучести.

Предел текучести — это минимальное напряжение, при котором возникает пластическая деформация без заметного увеличения нагрузки:

$$\sigma_{\text{уп}} = P_T / F. \quad (2.21)$$

Дальнейший процесс деформирования из-за наклепа и связанного с ним упрочнения материала требует увеличения нагрузки. Наклеп

возникает вследствие увеличения плотности дислокаций и на диаграмме соответствует участку CD . При дальнейшем возрастании нагрузки деформация увеличивается и, в конечном счете, достигает значения $P_{\max}$, соответствующего пределу прочности.

Предел прочности — это напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, предшествующей разрушению:

$$\sigma_B = P_{\max} / F. \quad (2.22)$$

При нагрузке $P_{\max}$ деформация локализуется, т. е. сосредотачивается в наиболее слабом сечении детали и развивается катастрофически быстро (участок DE). В точке E происходит окончательное разрушение детали.

Пластические деформации могут возникать также в результате релаксации¹ внутренних напряжений в деталях, которые вызывают их коробление. Такие повреждения характерны для блоков и головок цилиндров двигателя, корпусных деталей коробок передач, задних мостов, рам кузовов и других деталей автомобилей.

Основные причины возникновения остаточных напряжений в объемах деталей связаны с нарушением технологии их изготовления или ремонта (превышение скоростей и нагрузок при расточке цилиндров двигателей, температурные отклонения при шлифовании шеек коленчатого вала, проведение сварочных работ и т. д.).

2.3.3. Усталостное разрушение материалов деталей

Усталостное разрушение происходит в результате постепенного изменения физико-механических свойств в металлических деталях машин из-за многократного воздействия знакопеременных нагрузок.

Большое количество деталей машин работает в режиме повторных переменных напряжений. Примерами могут служить детали двигателя внутреннего сгорания (валы, шатуны, шестерни, поршни и др.), рамы, рессоры, кузова и кабины автомобилей и многие другие конструктивные элементы. Практика эксплуатации машин показывает, что материалы этих деталей разрушаются, несмотря на то, что напряжения от действия на них нагрузок не превышают предел упругости $\sigma_{\text{уп}}$.

¹ *Релаксация* — процесс постепенного перехода термомеханической системы из неустановившегося состояния, вызванного внешними воздействиями, в состояние термодинамического равновесия.

Исследования причин такого явления показали, что при многократном действии повторных нагрузок материал детали как бы «устает», его несущая способность исчерпывается, и он разрушается. Причиной этого является постепенное накопление пластической деформации, которое и приводит к разрушению.

Механизм усталостного разрушения детали заключается в следующем. В идеальной атомной решетке материалов, в которых отсутствуют внешние или внутренние остаточные напряжения, атомы находятся в равновесном состоянии. В реальных же материалах конструктивных элементов машин кристаллическая решетка всегда имеет так называемые местные дислокации (атомная решетка искажена) из-за наличия пустот, включений и т. д.

При приложении внешних нагрузок происходит перемещение этих дислокаций путем скольжения. Для их продвижения и развития пластической деформации больших нагрузок не требуется. При этом общее число дислокаций увеличивается, что приводит к увеличению сопротивления скольжения из-за деформационного упрочнения материала (наклепа). Именно в местах скольжения дислокаций перед препятствиями (посторонними внедрениями) зарождаются *микроскопические трещины*, вызываемые разрывом связей в кристаллической структуре металла. Локальные напряжения в области скольжения дислокаций в этот период эксплуатации конструктивных элементов превышают предел текучести материала σ_T .

Таким образом, процесс усталостного разрушения можно подразделить на три стадии:

- в начальной стадии из-за циклических нагрузок, не превышающих предела упругости, в металле накапливаются упругие искажения кристаллической решетки;
- с увеличением числа циклов нагружения упругие напряжения кристаллической решетки, достигая критических значений, вызывают в материале возникновение субмикроскопических усталостных трещин;
- субмикроскопические трещины с дальнейшим увеличением числа циклов достигают размеров вначале микро-, а затем и макротрещин, и в результате при дальнейшем их развитии происходит окончательное разрушение детали.

Трещины начинают развиваться во втором, достаточно продолжительном периоде эксплуатации. По результатам ряда исследований, интервал между моментом образования усталостной трещины

и моментом разрушения металла составляет до 90 % общего срока службы детали.

Внутренние напряжения в материале конструктивных элементов возникают не только под действием эксплуатационных напряжений, но и вследствие остаточных напряжений, вызываемых силовыми и температурными воздействиями на материал детали в процессе ее обработки. Такие напряжения, сохраняющиеся в детали длительное время, интегрируются с напряжениями, возникающими в результате действия внешних эксплуатационных нагрузжений, усиливая или ослабляя их.

При механической обработке в поверхностных слоях детали возникают остаточные напряжения двух видов:

- макронапряжения, охватывающие большие объемы материала (напряжения I рода);
- микронапряжения в пределах одного или нескольких зерен кристаллической решетки (напряжения II рода).

На рис. 2.13 приведены типичные эпюры внутренних напряжений I рода, когда остаточные напряжения максимальны непосредственно у поверхностного слоя.

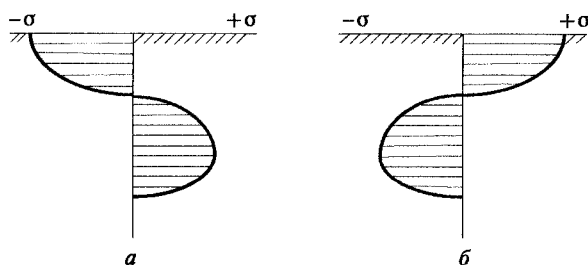


Рис. 2.13. Типичные эпюры остаточных напряжений I рода в поверхностном слое детали после механической обработки

Как следует из эпюр напряжения, в поверхностном слое могут быть как сжимающими (а), так и растягивающими (б). Наиболее неблагоприятное воздействие оказывают растягивающие напряжения, которые приводят к существенному снижению усталостной прочности и износостойкости.

Долговечность (ресурс, срок службы) деталей, работающих в условиях повторных переменных нагружений, определяется характеристиками выносливости.

Под **выносливостью** понимается способность металла выдерживать переменные напряжения длительное время без разрушения.

В качестве критериев, оценивающих это свойство металла, служат предел выносливости (усталости) и число циклов нагружения до наступления разрушения.

Предел выносливости — это максимальное напряжение, при котором металл образца не разрушается после бесконечного или заданного числа циклов нагружения.

Наглядной иллюстрацией зависимости между числом циклов нагружения до разрушения N и величиной напряжения σ является кривая выносливости (кривая Велера), которую получают с помощью испытаний серии гладких полированных образцов диаметром 10 мм (рис. 2.14).

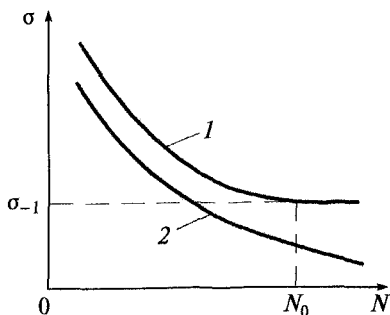


Рис. 2.14. Кривая выносливости:
1 — сталей; 2 — цветных металлов

Из графика (кривая 1) видно, что с уменьшением напряжения σ количество циклов N до разрушения образца возрастает, и при определенном значении напряжения образец может проработать без разрушения бесконечно большое количество циклов нагружения. Такое значение напряжения и принимают за физический *предел выносливости* σ_{-1} . Практика испытаний образцов из конструкционных сталей показывает, что если образец выдерживает, не разрушаясь, 10^7 циклов, то он не разрушится и в дальнейшем. Такое число циклов называют *базовым* N_0 , т. е. достаточным при усталостных испытаниях.

Не все металлы имеют участок кривой выносливости, параллельный оси абсцисс. Для цветных металлов и их сплавов, например,

кривая выносливости не имеет горизонтального участка и асимптотически приближается к оси N (кривая 2). В таких случаях определяют *ограниченный предел выносливости*, соответствующий заданному базовому числу циклов. Для цветных металлов и сплавов базовое число циклов принимается $N_0 = 10^8$.

В аналитической форме зависимость между числом циклов напряжения N_0 до разрушения, напряжением цикла σ и пределом выносливости σ_{-1} выражается формулой:

$$N_0 = k (\sigma - \sigma_{-1})^{-m}, \quad (2.23)$$

где k и m — параметры, значения которых зависят от механических свойств материала детали, ее конструкции и режима эксплуатационного нагружения.

На рис. 2.15 приведены экспериментальные зависимости между пределом выносливости стальных образцов σ_{-1} , работающих на изгиб, и пределом их прочности при работе на растяжение σ_B . Как следует из рисунка, для деталей с пределом прочности от 300 до 1200 МПа предел выносливости σ_{-1} пропорционален пределу прочности σ_B (линия AB) и принимается в среднем равным $\sigma_{-1} \approx 0,5\sigma_B$. Для сталей с более высоким пределом прочности (от 1200 до 1800 МПа) зависимость между пределами выносливости и прочности материала соответствует линии BC . Кривые 1 и 2 ограничивают область рассеивания результатов испытаний.

Кроме механических характеристик, на предел выносливости оказывают влияние такие факторы, как вид напряженного состояния,

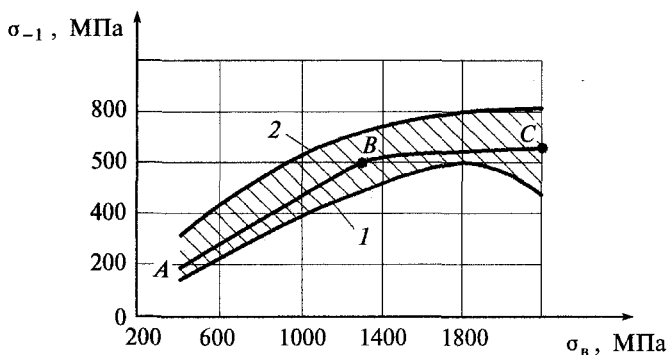


Рис. 2.15. Зависимости между пределами выносливости σ_{-1} и прочности σ_B стальных образцов

величина максимального и минимального нагружений, степень асимметрии цикла.

Испытаниями установлено, что наиболее неблагоприятным с точки зрения выносливости материала является симметричный цикл нагружения (рис. 2.16).

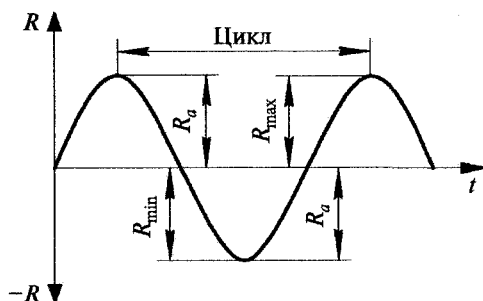


Рис. 2.16. Схема симметричного циклического нагружения

При таком цикле максимальное $R_{\max}$ и минимальное $R_{\min}$ значения нагрузок равны, средняя величина нагрузки цикла $R_{\text{cp}} = 0$, а коэффициент асимметрии $r = R_{\min} / R_{\max} = 1$.

Экспериментальными исследованиями выявлено, что частота приложения переменных нагрузок, характерных для нормальной эксплуатации машин, на предел выносливости материалов усталостному разрушению заметного влияния не оказывает. Лишь при частотах, превышающих 1000—2000 циклов в секунду, предел выносливости конструкционных сталей снижается, что объясняется интенсивным саморазогревом при локальных пластических скольжениях в испытуемых образцах и недостаточной эффективностью теплоотвода (охлаждения).

Кроме циклических воздействий, на предел выносливости существенное влияние оказывают форма и размер детали, виды и режимы ее обработки, физико-механические свойства материала, эксплуатационные факторы. Воздействие этих факторов приводит к тому, что предел выносливости реальных деталей машин σ_{-1} значительно ниже (в ряде случаев в 3—6 и более раз) пределов выносливости гладких цилиндрических образцов с полированной поверхностью.

С увеличением размеров детали увеличивается структурная неоднородность ее материала, которая в соответствии с гипотезой «слабо-

го» звена снижает сопротивление усталостному разрушению. Поэтому крупногабаритные конструктивные элементы более склонны к хрупкому разрушению, которое может произойти даже при упругих деформациях.

В практике это учитывается коэффициентом масштабного фактора

$$\epsilon_{\sigma} = \sigma_{-1d} / \sigma_{-1}, \quad (2.24)$$

где σ_{-1d} , σ_{-1} — пределы выносливости реальной детали и образца стандартного размера.

В табл. 2.4 приведены значения коэффициента масштабного фактора ϵ_{σ} для валов из конструкционных сталей в зависимости от их диаметра.

Таблица 2.4. Значение коэффициентов масштабного фактора

Сталь		Диаметр вала d , м					
		0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,10
Углеродистая	ϵ_{σ}	0,92	0,88	0,85	0,92	0,76	0,70
Легированная	ϵ_{σ}	0,83	0,77	0,73	0,70	0,65	0,52

Снижает предел выносливости детали наличие в ней различных концентраторов внутренних напряжений (рис. 2.17).

В деталях, имеющих такие конструктивные элементы, происходит перераспределение напряжений: они увеличиваются в зонах концентраторов и уменьшаются в сечениях, достаточно удаленных от них.

В качестве основного показателя, учитывающего влияние концентраторов напряжений на предел выносливости при переменных нагрузках, используется эффективный или действительный коэффициент концентрации:

$$k_{\sigma} = \sigma_{-1} / \sigma_{-1k}, \quad (2.25)$$

где σ_{-1} , σ_{-1k} — пределы выносливости образца без концентрации и с концентрацией напряжений.

Большое влияние на сопротивление усталостному разрушению оказывает состояние поверхностного слоя детали. С увеличением шероховатости, появлением на поверхности микрповреждений (мик-

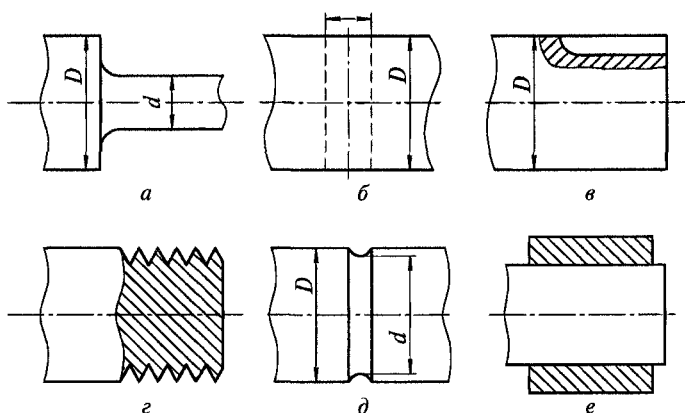


Рис. 2.17. Примеры концентраторов внутренних напряжений:

a — резкое изменение формы и размеров детали (вал с галтелью); *б* — поперечное отверстие; *в* — шпоночная канавка; *г* — резьба; *д* — выточка; *е* — края напрессованной детали

порисок, микротрещин, микронеровностей) выносливость материала детали существенно снижается. Это объясняется тем, что поверхностный слой при возникновении основных видов деформаций (изгибе и кручении) является наиболее напряженным, поэтому на поверхности детали и возникает, как правило, усталостная трещина.

В соответствии с ГОСТ 2789—73 влияние состояния поверхностного слоя детали учитывается коэффициентом качества поверхности β , представляющего собой отношение предела выносливости с определенной обработкой поверхности σ_{-1n} к пределу выносливости полированного образца σ_{-1} :

$$\beta = \sigma_{-1n} / \sigma_{-1}. \quad (2.26)$$

На рис. 2.18 показаны зависимости значения коэффициента β от предела прочности стали σ_b и вида обработки поверхности детали.

Различные виды механической, термической, химико-термической обработки изменяют остаточные напряжения и химический состав поверхностных слоев деталей, изменяя тем самым и их сопротивление усталостному разрушению. Для повышения предела выносливости детали подвергают закалке токами высокой частоты, химико-термической обработке, поверхностному пластическому деформированию. Эти виды обработки создают в поверхностном слое детали остаточные сжимающие напряжения, которые затрудняют за-

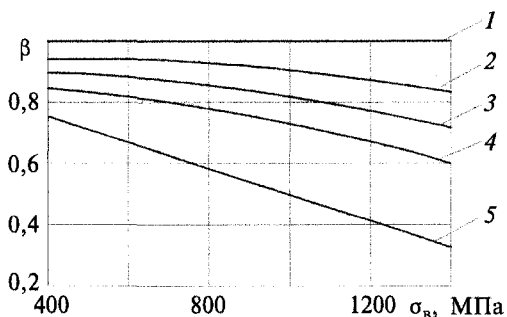


Рис. 2.18. Зависимость коэффициента качества поверхности β от предела прочности стали σ_b и вида обработки поверхности:

1 — полирование; 2 — шлифование; 3 — тонкая обточка; 4 — грубая обточка; 5 — наличие окалины

рождение и развитие трещин, повышая тем самым предел выносливости.

На характер образования в материале усталостных микротрещин оказывают влияние и внешние факторы, действующие на элемент конструкции одновременно с силовыми циклическими нагружениями. Наиболее существенными из этих факторов, характеризующих условия эксплуатации машины, являются *температура* и *коррозионная среда*.

Повторные переменные по величине и значению напряжения создают в местах скопления дислокаций большое число кратковременных температурных всплесков. При достаточно высоких частотах циклических нагружений такие температурные всплески приводят к увеличению средней температуры материала детали до значений, вызывающих его разупрочнение. Возникающие при этом тепловые напряжения при суммировании их с остаточными внутренними и внешними напряжениями снижают предел выносливости и ускоряют процесс образования микротрещин.

Как видно из рис. 2.19, после достижения определенной (номинальной) температуры T_0 характеристики прочности материала, в том числе и предел выносливости, с дальнейшим повышением температуры снижается. Снижается предел выносливости и при температуре ниже номинальной. Это особенно заметно при испытаниях углеродистых сталей, для которых при уменьшении температуры ниже некоторых предельных значений резко возрастает опасность хрупкого разру-

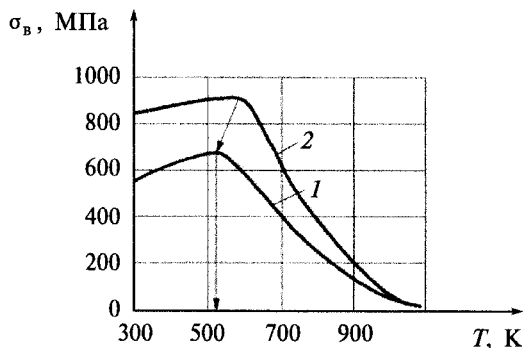


Рис. 2.19. Зависимость напряжений прочности σ_b от температуры:
1 — углеродистая сталь 45; 2 — легированная сталь 40Х

шения. Температура (или интервал температур), при которой происходит резкое снижение ударной вязкости, называется *порогом хладноломкости*.

Хладноломкость характеризуется понижением пластической деформации в изломе перед разрушением материала, уменьшением длины усталостной трещины, сменой вязкого, волокнистого вида излома кристаллическим. Поэтому в качестве порога хладноломкости обычно принимают температуру, при которой в изломе содержится 50 % вязких волокнистых и 50 % хрупких кристаллических составляющих.

Рабочая температура эксплуатации изделия должна быть выше порога хладноломкости материала, который для большинства сталей составляет $-40...-50$ °С. Чем выше температурный запас вязкости материала, т. е. разница между порогом хладноломкости и рабочей температурой, тем меньше риск усталостного разрушения изделия.

Многие детали, работающие в условиях переменных нагрузок, одновременно подвергаются воздействию коррозионной среды. Коррозия не только разрушает материал, она оказывает существенное влияние на процесс усталости металла.

Процесс разрушения металла при одновременном воздействии на него многократных циклических нагрузок и химически агрессивных сред называют **коррозионной усталостью**. Кислород и другие активные газы при взаимодействии с металлом увеличивают скорость распространения трещин и, соответственно, снижают предел выносливости (рис. 2.20).

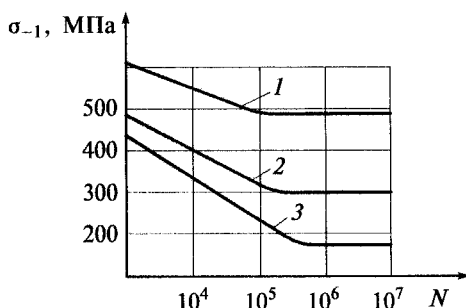


Рис. 2.20. Кривая выносливости образцов из стали 20Х13 с коррозионными повреждениями:

N — число циклов нагружения; 1 — новые; 2 — после эксплуатации на воздухе; 3 — после испытаний в морской воде

Для уменьшения отрицательного воздействия коррозионной среды на усталостное разрушение конструктивных элементов используют гальванические и лаковые покрытия, химико-термическую обработку, пластическое деформирование поверхности слоя, электрохимическую защиту.

2.3.4. Коррозионное разрушение деталей

Под *коррозией* понимается разрушение металлов вследствие их химического или электрохимического взаимодействия с коррозионной средой. В результате часть металла конструктивных элементов растворяется или переходит в ионное состояние с образованием окислов и солей. Способность металла сопротивляться коррозионному воздействию внешней среды называется *коррозионной стойкостью*.

Коррозия металла является одним из наиболее опасных видов разрушения конструктивных элементов машин. Ежегодно прямые потери от коррозии составляют 10 % всего выплаваемого металла. При этом, несмотря на огромные средства, выделяемые для борьбы с коррозией, общие убытки от нее непрерывно растут.

Значительные потери несут все развитые страны из-за коррозионных разрушений автомобилей. Особенно сильному коррозионному разрушению подвержены детали автомобилей, выполненные из тонколистовой стали (кузова, кабины, резервуары и др.), а также сварные швы, резьбовые соединения, детали топливной аппаратуры двигателей.

Коррозия не только разрушает материал, но и оказывает существенное влияние на другие физические процессы, приводящие к потере машиной работоспособности. Как правило, коррозия ускоряет процессы изнашивания, усталостного разрушения, снижает сопротивляемость материала пластическому деформированию.

Классификация коррозионных процессов

При классификации коррозионных процессов, характерных для конструктивных элементов машин, используются следующие классификационные признаки:

- механизм взаимодействия материала со средой;
- характер коррозионной среды;
- условия протекания процесса коррозии;
- характер разрушения металла.

По *механизму взаимодействия* материала со средой различают химическую и электрохимическую коррозию.

Химическая коррозия протекает в неэлектрических средах и заключается во взаимодействии металла с компонентами этих сред. Закономерности протекания химической коррозии те же, что и в процессе окисления металлов. На поверхности металла образуется пленка кислорода, адсорбированного или на чистой поверхности (химическая адсорбция), или молекулы кислорода закрепляются на поверхности предыдущего слоя (физическая адсорбция), или увеличивается толщина пленки окисла (реакция окисления).

Химическая коррозия развивается как в газовой, так и жидкой среде. Примером химической коррозии в газовой среде могут служить детали цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания, конструктивные элементы системы выпуска отработавших газов.

Коррозия в жидкой среде происходит при воздействии на металл агрессивных органических веществ: жидких топлив, растворителей, смазочных масел.

Скорость химического коррозионного разрушения зависит от химической активности и температуры среды, а также коррозионной стойкости материалов деталей. С повышением температуры коррозионные процессы разрушения металла активизируются.

Электрохимическая коррозия развивается при воздействии на металл электропроводной среды — раствора электролита.

Процесс электрохимической коррозии можно рассматривать как результат работы коррозионных гальванических элементов взаимодействия металла с электролитом (водой, водными растворами солей, кислот, расплавов солей).

В подавляющем большинстве случаев коррозионное разрушение деталей машин протекает по электрохимическому принципу. На поверхности конструктивного элемента образуется множество микрогальванических пар, взаимодействие которых и приводит к разрушению металла. На отдельных участках поверхности детали образуются катодные участки, на которых идет восстановление окислителей, находящихся в растворе электролита. На остальной поверхности детали, чаще всего на неровностях, локализуются анодные участки, на которых происходит растворение металла.

Наряду с образованием микрогальванических пар на поверхности одной детали, подобные пары возникают и между сопряженными деталями, изготовленными из разных металлов. Анодом в такой микрогальванической паре становится металл с отрицательным по отношению к материалу другой детали потенциалом.

Некоторые сплавы, в частности, стали различного химического состава, подвергаются межкристаллитной коррозии. Из-за неоднородности сплавов в их структуре имеются участки, на границах кристаллов которых возникают неодинаковые электрические потенциалы. В результате, отдельные кристаллитные зерна выступают в роли анодных, а другие — катодных участков. Возникают электрохимические процессы разрушения металла, которые приводят к точечному разъеданию анодных участков.

Интенсивность электрохимической коррозии зависит, главным образом, от скорости диффузии окислительных компонентов к поверхности металла, химических и электрохимических реакций. Скорость этих реакций обуславливается энергией активации взаимодействия металла с коррозионной средой, разницей потенциалов на их границе

$$I = \frac{U_c - U_m}{R}, \quad (2.27)$$

где I — сила электрического тока; U_c , U_m — электродные потенциалы среды и поверхности металла; R — омическое сопротивление.

Разность потенциалов, например, на границе капли атмосферной влаги и поверхности металла, достигает 6 В.

Из всех видов коррозии только при газовой не возникает электрический ток, так как в этой среде отсутствует разница потенциалов, т. е.

$$U_c - U_m = 0.$$

По характеру внешней среды, действующей на конструктивные элементы машин, различают атмосферную, газовую, жидкостную и биологическую коррозию. Для большинства деталей машин причиной коррозионного разрушения является именно атмосферная коррозия. Потери металла вследствие атмосферной коррозии составляют более половины общих потерь металла из-за коррозионного разрушения.

Атмосферной называют коррозию, возникающую под действием на металл атмосферного воздуха и содержащихся в нем твердых частиц различных примесей и влаги. Процесс разрушения металла при атмосферной коррозии носит электрохимический характер, интенсивность которого зависит от состава и температуры атмосферного воздуха, концентрации содержащихся в нем примесей. Растворенные в конденсате влаги на поверхности деталей примеси, содержащие серу, сернистый газ, сероводород и другие химические элементы активизируют электрохимические процессы.

На интенсивность разрушения металла при атмосферной коррозии оказывает существенное влияние и температура окружающего воздуха. При повышенных температурах, особенно в сочетании с высокой влажностью, коррозионные процессы разрушения деталей активизируются.

В зависимости от толщины пленки влаги на поверхности металла атмосферную коррозию можно условно подразделить на сухую, влажную и мокрую (рис. 2.21).

При *сухой коррозии* на металле под действием кислорода или сероводорода воздуха происходит окисление металла. На поверхности детали образуются не видимые глазом тончайшие окисные пленки по принципу химической коррозии. Такая коррозия вследствие слабой интенсивности процесса оказывает минимальное влияние на долговечность деталей.

Атмосферную коррозию, протекающую при относительной влажности менее 98 % под конденсационными пленками влаги (до 1 мкм), называют *влажной*. В условиях такой коррозии процесс взаимодействия металла со средой приобретает электрохимический характер. При

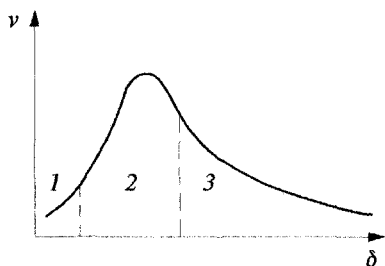


Рис. 2.21. Зависимость скорости атмосферной коррозии δ от толщины пленки влаги δ на поверхности металла:

1 — поверхность сухая; 2 — влажная; 3 — мокрая

этом скорость коррозионного разрушения поверхности металла резко возрастает с увеличением толщины пленки.

Атмосферную коррозию, протекающую при относительной влажности выше 98 % в условиях капельной конденсации или прямого попадания атмосферных осадков на поверхность металла с образованием пленок влаги, толщина которых превышает 1 мкм, называют *мокрой*. По своему механизму процесс подобен электрохимической коррозии. Скорость мокрой коррозии несколько ниже, чем влажной, так как слой жидкости затрудняет диффузию кислорода в поверхность металла. При полном погружении металла в воду скорость коррозии еще меньше.

В реальных условиях эксплуатации машин влажность, температура, агрессивность окружающей среды могут изменяться в широком диапазоне значений, поэтому подразделение атмосферной коррозии на сухую, влажную и мокрую достаточно условно. Обычно встречаются промежуточные виды атмосферного коррозионного воздействия на поверхности деталей.

Газовая коррозия является частным случаем химической коррозии и протекает при отсутствии пленок влаги на поверхности детали. Такой вид коррозии возникает в активных газовых средах при повышенной температуре. В подобных условиях работают, например, цилиндры, поршни, клапаны, выхлопные трубы двигателей внутреннего сгорания. Агрессивными свойствами при этом обладает не только кислород, но и пары воды, углекислота, сернистый газ, хлор, сероводород.

При газовой коррозии клапанов и выхлопной трубы происходит процесс образования окалины, который усиливается по мере роста

температуры нагрева. При циклических изменениях температуры в окалине возникают внутренние напряжения, которые обусловлены большой разницей коэффициентов линейного расширения (у окалины он намного меньше, чем у металла). В результате окалина разрушается.

Жидкостная коррозия металлов в зависимости от вида жидкой среды может носить как химический, так и электрохимический характер. В неэлектропроводящей среде (неэлектриках) жидкостная коррозия развивается по химическому варианту взаимодействия металла с агрессивными компонентами жидкости. Коррозионная активность таких жидкостей (топлива, смазочных масел) зависит от содержания в них серы, агрессивных продуктов окисления смазочных масел, хлора и других активных элементов присадок.

Процесс коррозионного разрушения в электропроводящих жидкостях (вода, водные растворы) принимает электрохимический характер. Электрохимические реакции возникают, например, в системе охлаждения двигателей с образованием накипи, которая ухудшает теплообмен между стенками блока цилиндров и охлаждающей жидкостью. Это, в свою очередь, приводит к снижению мощности двигателя, увеличению расхода топлива и масла.

Биологическая коррозия представляет собой процесс разрушения поверхностей металлов продуктами жизнедеятельности различных микроорганизмов (бактерий, грибов, плесени). Механизм разрушения при таком виде коррозии носит в основном электрохимический характер.

Продуктами жизнедеятельности микроорганизмов являются сера, сероводород, гидроокись железа, нитриды. Эти вещества обладают определенной коррозионной агрессивностью и стимулируют процессы разрушения металлов. Наибольшую интенсивность биокоррозионного разрушения вызывают бактерии, возникающие чаще всего на увлажненной поверхности металла в широком диапазоне температур.

По условиям протекания процессов коррозия подразделяется на контактную, шелевую, структурную, коррозию под напряжением и фреттинг-коррозию.

Контактная коррозия возникает при контакте разнородных металлов, имеющих разные электродные потенциалы. При погружении или смачивании контактов электролитами процесс коррозионного разрушения интенсифицируется. При этом преимущественное коррозионное разрушение происходит на поверхности детали с более

электроотрицательным потенциалом, являющимся в данных условиях анодным. Разрушение другой поверхности с электроположительным потенциалом (катодной) постепенно замедляется или прекращается. Контактная коррозия проявляется и в однородных металлах, соприкоснувшихся между собой болтами, заклепками, сваркой или пайкой.

Щелевая коррозия протекает в узких зазорах контактирующих поверхностей металлических деталей по механизму электрохимического процесса. Интенсивность развития такого вида коррозии зависит от глубины и ширины щели, а также отношения объема щели к ее поверхности. С уменьшением ширины щели скорость коррозии возрастает. Причиной щелевой коррозии является образование градиента концентраций агрессивного компонента внутри и вне щели. Это ведет к образованию коррозионной пары и ускоренному растворению анодного участка.

Щелевая коррозия возникает и в местах неплотного контакта между металлической и неметаллической поверхностями. Такому виду разрушения подвержены клапанные механизмы, калиброванные дозирующие устройства, гильзы цилиндров под резиновыми уплотнительными манжетами и др.

Структурная коррозия возникает в связи с изменением структуры металла, нарушением его неоднородности. В основе такого коррозионного разрушения лежит факт образования новых фаз по границам зерен. Прежде всего, это карбиды металла, которые служат катодными участками, а окружающие участки остального металла — анодом. В окислительных средах происходит интенсивное растворение продуктов коррозии в пограничных зонах между зернами (анодных участках).

Коррозия под напряжением протекает при одновременном воздействии коррозионной среды и механических напряжений, приводящих к деформации металла. В процессе деформирования металла снижается его термодинамическая стабильность, нарушается защитная пленка на поверхности, что способствует активизации процесса коррозии. Такому виду коррозии подвержены оси автомобилей, рессоры, клапаны двигателей внутреннего сгорания.

Фреттинг-коррозия развивается в конструктивных элементах, работающих в условиях пресовых посадок, когда под воздействием нагрузок и вибраций происходит проскальзывание одной поверхности относительно другой, контактирующей с ней. В результате такого взаимодействия появляются коррозионные язвы, а между поверхно-

стями — мелкие зерна оксидов. Процесс сопровождается локальными выделениями тепла, что приводит к химическому изменению в смазочном материале, их окислению и смолообразованию.

Фреттинг-коррозия может привести к ослаблению натяга контактирующих поверхностей или, наоборот, к их заклиниванию, если продукты коррозионного разрушения не имеют выхода из зоны контакта. Кроме того, в зависимости от механических характеристик поверхностей и напряженности соединения фреттинг-коррозия снижает предел выносливости металла в 2—3 раза.

По *характеру разрушения* в зависимости от степени охвата поверхности детали коррозия подразделяется на сплошную, которая охватывает всю поверхность детали, и местную, поражающую ее отдельные участки.

В зависимости от характера распространения и формы разрушения коррозия подразделяется на следующие виды (рис. 2.22):

- равномерная, развивающаяся с одинаковой скоростью по всей поверхности металла;
- неравномерная, протекающая на разных участках поверхности с различной скоростью;
- подповерхностная, начинающаяся с поверхности, но преимущественно распространяющуюся под ней таким образом, что разрушение и продукты коррозии оказываются сосредоточенными на некоторых участках внутри металла, вызывая его вспучивание и расслоение;

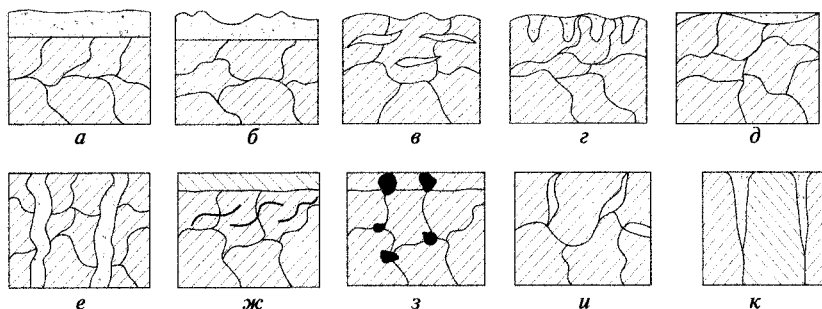


Рис. 2.22. Виды коррозии:

а — равномерная; *б* — неравномерная; *в* — подповерхностная; *г* — точечная; *д* — в виде отдельных коррозионных пятен; *е* — сквозная; *ж* — нитевидная; *з* — структурная; *и* — межкристаллитная; *к* — ножевая

- точечная в виде отдельных точечных коррозионных поражений, диаметр которых меньше глубины проникновения;
- в виде отдельных коррозионных пятен, диаметр которых значительно превышает глубину проникновения;
- сквозная, вызывающая коррозионное разрушение металла насквозь;
- нитевидная, распространяющаяся в виде нитей преимущественно под неметаллическими защитными покрытиями;
- структурная, связанная со структурной неоднородностью металла;
- межкристаллитная, которая распространяется по границам кристаллов (зерен) металла;
- ножевая, распространяющаяся на участках сплавления (сварки) металлов деталей, работающих в агрессивных средах.

Любое коррозионное повреждение материала конструктивного элемента снижает его долговечность. Наибольшую опасность для функционирования машины представляет местная (локальная) коррозия, так как при сравнительно небольшой потере металла все прочностные характеристики деталей снижаются. Конструктивные элементы, работающие в условиях переменных нагрузок и имеющие локальные коррозионные повреждения, теряют свою усталостную прочность. Коррозионное повреждение трущихся поверхностей деталей существенно снижает их износостойкость. Из-за развития коррозионных процессов деталей теряется прочность прессовых посадок.

Количественными показателями оценки коррозионного разрушения служат:

- глубина проникновения и размеры очага коррозии;
- количество коррозионных очагов, возникших в течение заданного времени;
- изменение массы детали, отнесенной к единице поверхности и единице времени;
- скорость распространения коррозии и др.

Для ответственных элементов конструкции машин наиболее эффективным показателем оценки коррозии является глубина ее проникновения в материал детали.

В целом ряде исследований приведены достаточно убедительные данные о влиянии глубины коррозионных каверн на существенное (до 50 %) снижение предела усталости, вполне сопоставимое со сни-

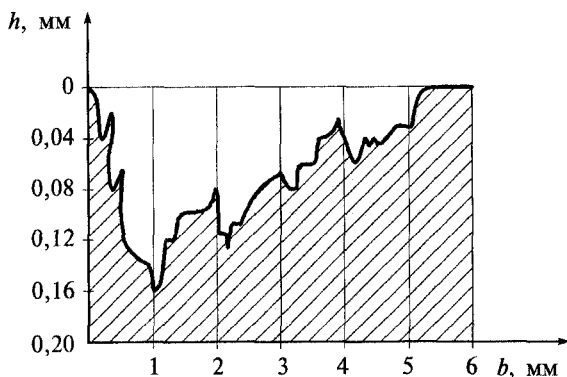


Рис. 2.23. Очаг коррозионного разрушения на крыле автомобиля:
 h и b — глубина и ширина каверны

жением усталостной выносливости от надрезов и других концентраторов напряжения. На рис. 2.23 показан пример очага коррозии крыла автомобиля по глубине и ширине поражения после заданного периода эксплуатации в условиях внешней агрессивной среды. Измерения проводились с помощью специального прибора с разрешающей способностью 0,25 мкм.

Факторы, влияющие на развитие коррозионных процессов

На характер и скорость протекания коррозионных процессов оказывает влияние множество разнообразных факторов, которые обусловлены состоянием и химическим составом металла, технологией изготовления деталей, условиями эксплуатации и т. д.

Условно их можно подразделить на четыре группы:

- характеризующие состояние металла;
- характеризующие конструктивное исполнение деталей;
- технологические;
- эксплуатационные.

К важнейшим факторам, характеризующим *состояние металла*, относятся их термодинамическая устойчивость, соотношение компонентов в составе, структура, неоднородность поверхностного слоя, внутренние остаточные напряжения.

Большинство металлов в воздушной среде и водных растворах электролитов термодинамически неустойчиво. Коррозионные процессы протекают в них самопроизвольно. Поэтому для повышения

коррозионной стойкости используют легирование металлов более стойкими к коррозии элементами.

Снижению коррозионной стойкости металлов способствует электрохимическая неоднородность их поверхности, причинами которой являются наличие металлических и неметаллических электропроводных макровключений, контакт разнородных материалов, неоднородность защитных пленок и т. п.

К *конструктивным факторам* относятся: конструкция деталей и сопряжений (наличие застойных зон, зазоров, щелей); контакт металлов, имеющих различные электродные потенциалы; характер соединения элементов конструкции (сварное, резьбовое, шлицевое, заклепочное и др.); концентрация напряжений; характер нагружения.

Контакты металлов с различными электродными потенциалами (например, коррозионностойкая сталь — алюминиевый сплав, коррозионностойкая сталь — оцинкованная поверхность, алюминиевый сплав — кадмиевое покрытие и др.) способствуют возникновению и развитию коррозионных процессов. Контакт металла с полимерным материалом нередко приводит к возникновению коррозии в результате выделения коррозионно активных ингредиентов из полимера, удержанием им влаги и растворения в ней агрессивных реагентов.

Существенное влияние на коррозионный процесс оказывает характер соединения деталей в конструкции. Все виды соединений, выполненные с дефектами, содержат застойные зоны (щели и зазоры), в которых удерживается электролит и накапливаются продукты износа. Особую опасность представляют неконтролируемые застойные зоны, скопление электролита в которых приводит к интенсивному развитию локальной коррозии. Коррозия в таких местах обнаруживается обычно после образования сквозных разрушений металла.

Из *технологических факторов* наиболее существенное влияние на развитие коррозионного процесса оказывают включения в металл различных примесей в процессе изготовления деталей. Они попадают в материал детали в процессе получения полуфабрикатов (литье, обработке давлением и др.); при обработке поверхностей (механической, химико-термической, электрохимической и т. п.); при соединении элементов конструкции (дефекты сварки, пайки и др.).

Большое влияние на развитие коррозионных процессов оказывают *эксплуатационные факторы*: продолжительность эксплуатации, температура и диапазон ее изменения, состав атмосферы, характер

загрязнения поверхностей, внешние нагрузки, наличие стимуляторов (ингибиторов) коррозии, солнечная радиация.

Коррозия на открытых и доступных поверхностях деталей может быть своевременно выявлена, поэтому возможно принять необходимые меры к прекращению или снижению интенсивности процесса. При эксплуатации машин следует контролировать и при необходимости восстанавливать защитные покрытия, удалять продукты коррозии, загрязнения и влагу с поверхностей деталей.

Методы защиты от коррозии

Методы защиты деталей от коррозии направлены на устранение или снижение активности факторов, способствующих развитию коррозионных процессов.

Условно их можно подразделить на три группы:

- методы воздействия на металл;
- методы воздействия на среду;
- комбинированные методы.

Из первой группы наибольшее распространение получили методы нанесения защитных покрытий, повышения коррозионной стойкости металлов, использование деталей из полимерных материалов.

В настоящее время при изготовлении конструктивных элементов машин широко используются защитные покрытия, наносимые на их поверхности. Повышение коррозионной стойкости деталей достигается такими методами:

- погружение в ванну с расплавленным металлом (оцинкование, лужение, свинцевание);
- химико-термическая обработка (цементация, азотирование, цианирование);
- гальваническое покрытие (твердое хромирование, блестящее оцинкование, кадмирование и др.);
- диффузия в верхний слой металла (алитирование, диффузионное хромирование);
- химическая обработка поверхности металла (оксидирование, фосфатирование, хроматирование).

Большую роль в защите машин от коррозии играют лакокрасочные покрытия (ЛКП). Особенно эффективны такие покрытия в качестве внешнего защитно-декоративного слоя в сочетании с металлическими покрытиями. ЛКП представляет собой сложное комбиниро-

ванное покрытие, каждый слой которого имеет свое назначение и требует выполнения ряда технологических операций. Получение, например, надежного коррозионностойкого ЛКП кузова или кабины автомобиля включает следующие процессы:

- *обезжиривание* поверхности с помощью водных щелочных препаратов (КМ-1, МС-15 и др.);
- *фосфатирование* — процесс химической обработки с целью получения на поверхности прочного неэлектропроводного покрытия;
- *грунтование*, которое служит для образования связующего слоя между подложкой и последующими слоями покрытия;
- *шпатлевание*, предназначенное для выравнивания мелких дефектов на загрунтованных поверхностях;
- *окрашивание* — завершающая стадия нанесения покрытия.

Наибольшее распространение для окончательной окраски получили синтетические эмали марок МЛ, обеспечивающие высокие физико-механические свойства и качество покрытий. Окрашенные такими эмалями поверхности отличаются повышенным блеском, способностью длительное время сохранять свои свойства при эксплуатации в разных климатических условиях.

Перспективным методом снижения коррозионных повреждений деталей является использование при их изготовлении металлов повышенной коррозионной стойкости (легированные стали и чугуны, алюминиевые сплавы и др.), а также из различных пластических и композиционных материалов.

К методам защиты машин от коррозионного воздействия среды относятся прежде всего герметизация сопряжений; максимальное сокращение застойных зон, щелей, зазоров; очистка атмосферного воздуха от загрязнений; поддержание оптимальных температурных режимов; введение качественных противокоррозионных присадок в состав смазочных материалов. При эксплуатации машин для снижения интенсивности развития коррозионных процессов необходимо постоянно контролировать и своевременно восстанавливать поврежденные защитные покрытия.

При отсутствии желаемого эффекта от отдельного применения методов воздействия на металл и агрессивную среду используют комбинированные методы, основанные на комплексном воздействии на металл и среду. Комплексная защита направлена на решение двух основных задач. Первая заключается в оптимизации выбора коррозион-

нстойких металлов и сплавов, нанесении защитных покрытий, вторая — в обеспечении контроля и управления защитой от коррозии в эксплуатации.

2.3.6. Старение материалов конструктивных элементов

Старением материалов называются процессы изменения их физико-механических свойств во времени в условиях длительного хранения. Старение, как правило, обусловлено недостаточно стабильным равновесным состоянием материала и постепенным его переходом в стабильное (равновесное) состояние.

К старению металлов относятся все процессы изменения во времени их свойств, связанные с превращениями металлов в твердом состоянии.

Условно эти процессы можно подразделить на две группы:

- превращения, связанные только с изменением кристаллической структуры металла без изменения химического состава;
- превращения, сопровождающиеся образованием фаз с изменением химического состава металла.

В первом случае процессы старения связаны с распадом мартенситной структуры металлических сплавов. Эти процессы обусловлены неустойчивой структурой сплава, возникающей в результате технологической обработки деталей (термообработкой, пластическим деформированием и т. д.) и приводящей к появлению искажений кристаллической решетки. Такое состояние характеризуется повышенным по сравнению со стабильным состоянием уровнем внутренней (свободной) энергии. Поэтому сущность процесса старения заключается в самопроизвольном переходе из нестабильного состояния в стабильное с более низким уровнем внутренней энергии, связанной с атомными перемещениями в решетке металла. При этом атомы в решетке не обмениваются местами, а лишь смещаются относительно друг друга на расстояния, не превышающие межатомные.

Механизм процесса старения сплава с образованием фаз и изменением химического состава заключается в следующем. На первой стадии происходит направленная диффузия атомов компонентов сплава (присадки к основному металлу) и их скопление в определенных участках кристаллической решетки. На второй стадии в этих участках формируются очень малые объемы с новой кристаллической решет-

ной основного металла и присадки. На третьей стадии происходит отрыв одной решетки от другой и образование дисперсных частиц новой фазы. На четвертой стадии происходит укрупнение дисперсных частиц и переход нестабильной модификации новой фазы в стабильную.

В результате старения с образованием новых фаз двух различных решеток происходит упрочнение сплавов, увеличение их твердости, повышение сопротивления пластической деформации и коррозионному разрушению. Следует отметить, что укрупнение дисперсионных частиц, происходящее в четвертой (заключительной) стадии старения, сопровождается постепенным разупрочнением металла. В стареющих сплавах нередко наблюдается коррозионное растрескивание под напряжением.

С целью улучшения или стабилизации характеристик металла деталей машин на практике нередко предусматривают операции искусственного старения. Однако при этом следует учитывать, что наряду с улучшением одних характеристик материала деталей может произойти ухудшение других. Так, например, упрочнение металла при старении сопровождается одновременным снижением его пластичности.

На процесс искусственного старения основное влияние оказывает температура нагрева детали. Скорость процесса резко увеличивается с повышением температуры, и, соответственно, существенно уменьшается время достижения стабильного равновесия. Например, отпуск металла при температуре 100 °С осуществляется в течение одного часа, а при 20 °С процесс достижения стабильного состояния происходит в течение нескольких лет.

Старение деталей из неметаллических материалов заключается в изменении во времени их физико-механических свойств под влиянием окружающей среды и условий эксплуатации: кислорода воздуха, перепад температур, влажности, воздействие солнечных лучей и др.

Старение технических полимерных материалов обусловлено в основном процессами, приводящими к деструктуризации полимеров, т. е. распаду основных цепей макромолекул на более простые или изменению строения макромолекул и взаимодействия между ними без разрыва основных цепей. При старении полимеров изменяются структура, молекулярный вес, химический состав, взаимодействие макромолекул, определяющие физико-механические свойства этих материалов: прочность, твердость, пластичность, эластичность и др.

Под влиянием кислорода воздуха и при повышенной температуре в зоне трения происходят механохимические процессы старения

резинотехнических изделий, широко используемых в транспортных машинах. Например, в процессе эксплуатации шин в резине наблюдается изменение молекулярной структуры поверхностного слоя, и, как следствие, ухудшаются ее прочностные, усталостные и другие свойства.

Под воздействием повышенной температуры, окислительных реакций, срабатывания присадок ускоряются процессы старения масел, ухудшающие их физико-механические свойства (вязкость, плотность, модуль упругости, предел прочности на сдвиг). Наиболее интенсивно процесс старения смазочных материалов протекает в условиях высоких температур, например, в зоне поршневых колец двигателя внутреннего сгорания, где тонкая пленка масла имеет очень высокую температуру и концентрацию продуктов сгорания топлива.

Ухудшение эксплуатационных свойств масел при их старении приводит к тому, что они перестают выполнять заданные функции, тем самым интенсифицируя процессы трения и изнашивания.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные виды эксплуатационных нагружений.
2. Что понимается под силовым эксплуатационным нагружением?
3. Назовите режимы силового нагружения конструктивных элементов машин.
4. Какими параметрами характеризуется циклический (колебательный) режим динамического нагружения?
5. Объясните механизм термомеханического нагружения.
6. Назовите основные причины, вызывающие отказы и повреждения машин.
7. Перечислите основные виды трения рабочих поверхностей машин.
8. Какими количественными показателями оценивается процесс трения?
9. Раскройте физическую сущность изнашивания.
10. Какие виды деформирования и разрушения возникают при изнашивании?
11. Перечислите основные и сопутствующие процессы изнашивания.
12. Раскройте сущность процесса пластического деформирования материала деталей.
13. Перечислите основные виды деформаций в зависимости от прилагаемых нагрузок.

-
14. Какие физические процессы приводят к усталостному разрушению?
 15. Какими характеристиками оценивается долговечность деталей, работающих в условиях переменных нагрузок?
 16. Назовите основные факторы, оказывающие влияние на выносливость металла.
 17. Что понимается под коррозионным разрушением?
 18. Объясните сущность химических и электрохимических процессов коррозии.
 19. Какие виды коррозионного разрушения возникают в деталях машин?
 20. Назовите способы защиты деталей от коррозионного разрушения.

Глава 3

ВИДЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ

3.1. Классификация видов изнашивания

В зависимости от факторов, определяющих тот или иной процесс разрушения поверхности детали при трении, все виды изнашивания подразделены на три основные группы: механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое (рис. 3.1).

Механическое изнашивание происходит только в результате механических воздействий на поверхность трения.

Абразивное изнашивание — наиболее распространенный вид изнашивания. Вызывается наличием на поверхности трения абразивных частиц, попавших с воздухом, топливом и маслом (вследствие недостаточной фильтрации), а также образовавшихся при разрушении микрообъемов трущихся поверхностей. Абразивный износ возможен

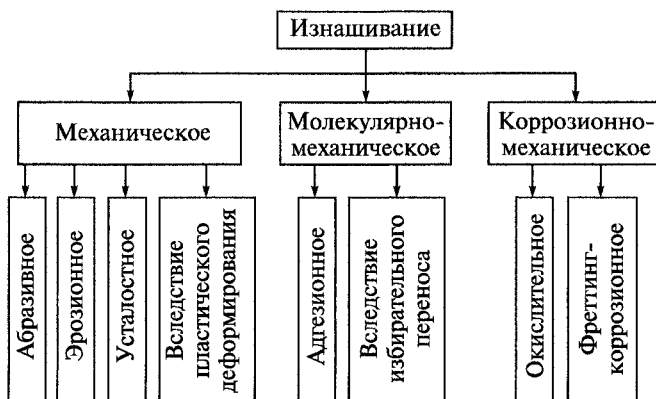


Рис. 3.1. Виды изнашивания деталей

и тогда, когда твердые составляющие одного из сопряженных тел оказывают режущее или царапающее воздействие на другое сопряженное тело. Этому виду изнашивания подвержены практически все детали транспортных и других машин.

Интенсивность абразивного изнашивания зависит от размеров, формы, твердости и свойств абразивных частиц, а также от физико-механических характеристик материалов сопряжений, удельного давления на поверхность трения, скорости относительного скольжения, характера смазки. В результате абразивного изнашивания на рабочих поверхностях деталей образуются риски и царапины, возникает упруго-пластическое деформирование и протекают процессы усталостного разрушения поверхностного слоя. Такие повреждения характерны, например, для поверхностей цилиндров и юбок поршней двигателей внутреннего сгорания. На них наблюдаются риски и царапины от воздействия абразивных твердых частиц различного происхождения (продуктов изнашивания, мелких абразивных частиц, попавших в зону трения с воздухом, топливом и маслом).

При анализе процессов абразивного изнашивания наблюдаются две четко выраженные формы его проявления: механохимическая (коррозионно-механическая) и механическая (рис. 3.2). Проявление этих форм зависит от соотношения твердости абразивных частиц и рабочих поверхностей деталей.

Если твердость абразивной частицы H_a и твердость основного материала детали H_m соизмеримы, наблюдается механохимическая форма изнашивания. Результатом такого изнашивания является разрушение абразивными частицами окисной пленки поверхностного слоя детали (рис. 3.2, а). При соотношении твердостей $H_a/H_m > 1,7$ возникает механическая форма повреждаемости (микрорезание), т. е. по-

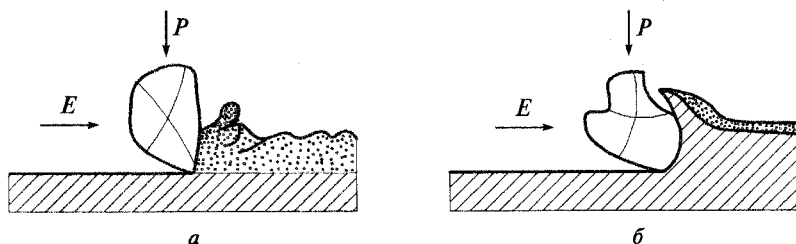


Рис. 3.2. Формы абразивного изнашивания:
а — механохимическая; б — механическая

вреждение абразивными частицами основного материала детали (рис. 3.2, б).

Абразивное изнашивание является одним из наиболее интенсивных процессов разрушения рабочих поверхностей при трении. Для уменьшения отрицательного влияния такого вида изнашивания на долговечность машин при их конструировании предусматриваются эффективные средства герметизации сопряжений, высококачественные фильтры для очистки воздуха, масел и топлива.

Разновидностью абразивного износа являются *гидроабразивное* и *газоабразивное изнашивание*. Такие виды изнашивания возникают в результате действия твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе и перемещающихся относительно изнашивающегося тела. Гидроабразивному виду изнашивания подвержены плунжерные пары, «мокрые» гильзы цилиндров дизельных двигателей, трубопроводы.

Газабразивному виду изнашивания подвержены клапана, поршневые кольца, зеркала цилиндров двигателей в результате контакта с потоком раскаленных газов. Интенсивность разрушения при газо- и гидроабразивном изнашивании зависит от следующих основных факторов:

- энергия удара частиц в потоках газа или жидкости;
- твердость, прочность, размер и геометрия этих частиц;
- угол атаки, т. е. наклона вектора движения потока жидкости (или газа), несущего абразивные частицы, к поверхности детали.

Интенсивность гидро- и газабразивного изнашивания определяется из выражения

$$J = k \cdot v^m, \quad (3.1)$$

где k — коэффициент, величина которого зависит от свойств абразивных частиц и параметров потока жидкости или газа; v — скорость потока; m — показатель степени, зависящий от материала детали.

На интенсивность разрушения при этом виде изнашивания оказывает существенное влияние направление движения абразивных частиц относительно профиля поверхности детали (угол атаки). При малых углах атаки абразивных частиц в потоке жидкости или газа динамические воздействия на микронеровности поверхности незначительны, и интенсивность изнашивания минимальна (рис. 3.3).

С ростом угла атаки до 30° интенсивность гидро- и газабразивного изнашивания материалов с невысокой прочностью увеличивает-

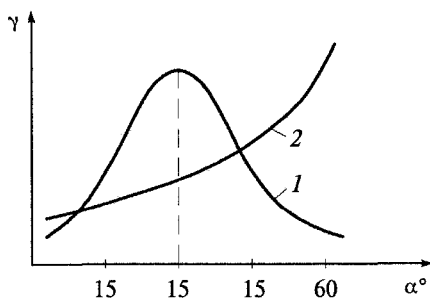


Рис. 3.3. Зависимость интенсивности гидро- и газобразивного изнашивания γ от угла атаки α абразивных частиц:

1 — пластичные материалы; 2 — хрупкие материалы

ся. С дальнейшим увеличением угла атаки наблюдается эффект упрочнения поверхности, аналогичный наклепу, поэтому интенсивность изнашивания снижается. У хрупких материалов, обладающих высокой прочностью поверхностного слоя детали, интенсивность изнашивания резко возрастает начиная с угла атаки $50\text{--}60^\circ$, так как при меньших углах материал хорошо выдерживает воздействие абразивных частиц.

Эрозионное изнашивание — это изнашивание поверхности в результате механического воздействия на нее потока жидкости или газа, а также под влиянием электрических разрядов. В результате эрозионного изнашивания на поверхности трения возникают раковины, каверны, питтинги. Разновидностями эрозионного изнашивания являются газовая, гидравлическая, электрическая эрозии, кавитационное разрушение.

Газовая эрозия — поверхностное разрушение деталей машин при контакте с потоком газов. Этому виду изнашивания подвержены поршневые кольца, зеркала цилиндров двигателей, выхлопные трубы, глушители автомобилей и др. Высокая температура, скорость и химическая активность газа способствуют процессам разрушения рабочих поверхностей таких деталей.

Гидроэрозионным изнашиванием называется поверхностное разрушение деталей машин при динамическом воздействии потока жидкости. Такое изнашивание наблюдается в плунжерных парах, деталях гидронасосов, трубопроводах и т. д.

Электроэрозия — это изнашивание под воздействием импульсных разрядов электрического тока. Такому виду изнашивания подверже-

ны токопроводящие материалы деталей (например, электроды свечей зажигания).

Кавитационное изнашивание (кавитационная эрозия) возникает при движении жидкости относительно поверхности детали (или твердого тела относительно жидкости), когда вблизи поверхности образуются, а затем «захлопываются» в зоне повышенного давления парогазовые пузырьки. В результате разрушения этих пузырьков возникают локальные гидравлические удары большой силы с образованием каверн (полостей). Такой износ наблюдается на наружных поверхностях мокрых гильз цилиндров двигателей, лопастях и полостях водяных насосов, в трубопроводах и других деталях при отсутствии в рабочей жидкости абразивных частиц.

Усталостное изнашивание (контактная усталость) является следствием циклического воздействия на вершины микронеровностей трущихся поверхностей. Такой вид механического изнашивания характерен для большинства сопряжений машин и возникает как при трении качения, так и при трении скольжения. При чистом качении деталей друг относительно друга усталостное изнашивание проявляется в развитии очагов разрушения поверхностей в виде ямок (питтингов). При трении скольжения усталостное изнашивание происходит вследствие усталости микрообъемов материала контактирующих поверхностей. Под действием циклических нагрузок на поверхности детали возникают усталостные микротрещины, которые постепенно смыкаясь, приводят к образованию и отделению частиц металла.

На интенсивность усталостного изнашивания наиболее существенное влияние оказывают контактная выносливость материала и условия трения (нагрузка, температура, используемые смазочные материалы).

Способность материала сопротивляться контактной усталости называется *контактной выносливостью*, которую оценивают наработкой детали до начала отрыва частиц металла с поверхности и максимальным контактным напряжением, при котором не начинается образование питтинговых разрушений при заданном числе циклов нагружения. Нарботка до начала усталостного выкрашивания возрастает с увеличением вязкости смазочного материала μ и твердости рабочей поверхности H , а уменьшается с ростом эксплуатационного нагружения P (рис. 3. 4).

Чаще всего усталостное изнашивание проявляется в виде местного выкрашивания на поверхностях сопряженных деталей, перекаты-

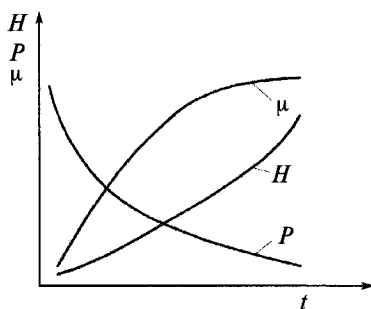


Рис. 3.4. Зависимость наработки до возникновения усталостного выкрашивания от твердости металла H , эксплуатационного нагружения P и вязкости смазочного материала μ

вающихся под нагрузкой с проскальзыванием или без него. В таких условиях работают, например, элементы подшипников качения, зубчатые колеса, кулачки и толкатели клапанного механизма, вкладыши подшипников коленчатого вала двигателя и другие детали.

При изнашивании вследствие **пластического деформирования** происходит изменение макрогеометрических размеров детали без потери массы под воздействием передаваемой нагрузки или под влиянием сил трения. Пластическое деформирование поверхностей происходит постепенно и сопровождается некоторым уплотнением поверхностных слоев. Такому износу подвержены резьбовые, шпоночные и шлицевые соединения, втулки шатунов, вкладыши подшипников и др.

Молекулярно-механическое изнашивание (изнашивание при схватывании) возникает в результате одновременного механического и атомно-молекулярного взаимодействия материалов контактирующих поверхностей деталей.

Адгезионное изнашивание связано с возникновением в локальных зонах контакта поверхностей интенсивного молекулярного взаимодействия, силы которого превосходят прочность связей материала поверхностных слоев с основным материалом. При трении металлических пар происходят схватывание (схватывание II рода) по вершинам неровностей контактирующих поверхностей и их последующее разрушение. В результате возникает вырывание частиц материала, их перенос с одной поверхности на другую и абразивное воздействие вновь образовавшихся неровностей на сопряженную деталь. Такие процессы происходят, когда между сопряженными деталями исчезает разделяющая их смазка, а также окисные пленки. Под действием эксплуа-

тационных нагрузок рабочие поверхности деталей сближаются на расстояние межатомного взаимодействия.

По интенсивности развития различают следующие степени молекулярно-механического изнашивания:

- натир — появление блестящих участков износа, которые не имеют видимых повреждений, но являются потенциально опасными для возникновения схватывания контактирующих поверхностей;
- задир — образование видимых повреждений в виде борозд в направлении скольжения;
- заедание — самая тяжелая форма молекулярно-механического изнашивания, сопровождающегося прочным соединением (схватыванием) контактирующих участков поверхностей трения. Схватывание происходит при местном разрыве смазочной пленки и возникновении непосредственного металлического контакта трущихся поверхностей. Обычно это связано с перегрузкой сопряжения, резким повышением температуры масла в поверхностных слоях, локальными температурными всплесками.

Под действием высоких эксплуатационных нагрузок рабочие поверхности деталей сближаются на расстояние межатомного взаимодействия, в результате чего образуются металлические связи.

Разрушение адгезионных связей может происходить по месту образования связей (адгезионное разрушение) или на некоторой глубине рабочей поверхности с вырыванием частиц металла и их переносе с одной, менее прочной поверхности на другую, более прочную (рис. 3.5).

Изнашивание в результате схватывания является одним из наиболее опасных и разрушительных. Нередко оно сопровождается проч-

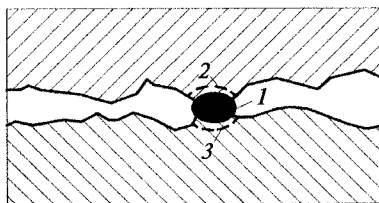


Рис. 3.5. Схема образования схватывания контактирующих поверхностей:
1 — локальный участок схватывания; 2, 3 — линии границ разрушения металлических связей

ным соединением контактирующих участков поверхностей трения. В отличие от изнашивания других видов, для которых необходимо определенное время на развитие процесса и накопление разрушительных повреждений, при схватывании разрушение поверхности наступает достаточно быстро и приводит к аварийным формам повреждений. Такой вид изнашивания относится к недопустимым, оно возникает в основном при грубых нарушениях нормальных режимов эксплуатации машин.

Избирательный перенос — вид молекулярно-механического изнашивания, возникающий при взаимодействии трущихся поверхностей с образованием защитной, так называемой серовитной пленки. Такая пленка образуется в зоне трения в результате электрохимических процессов, развивающихся в парах трения: медь—сталь, бронза—сталь, алюминий—чугун и др.

При молекулярном взаимодействии в процессе трения серовитная пленка осаждается на стальную поверхность, сглаживая ее шероховатость и образуя защитный слой. При этом фактическая площадь контакта за счет заполнения микронеровностей увеличивается в десятки раз, а давление равномерно распределяется по всей рабочей поверхности. В результате коэффициент трения уменьшается до значения, соответствующего жидкостному трению, при котором усталостное изнашивание отсутствует.

В отличие от адгезионного молекулярно-механического изнашивания, которое является опасным и разрушительным, изнашивание при избирательном переносе обеспечивает наиболее благоприятную работу сопряжения. В результате молекулярного взаимодействия происходит перенос более мягкого, разрыхленного металла на противоположную более твердую поверхность сопряжения.

Для создания условий избирательного переноса в узлах трения применяют соответствующие смазочные материалы, содержащие в качестве присадок *поверхностно-активные вещества*. Они вступают в физико-химическое взаимодействие с мягким металлом (медью), разрыхляют его поверхностный слой и обеспечивают возникновение серовитной пленки.

Коррозионно-механическое изнашивание возникает при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие с агрессивной внешней средой. Такой средой может быть пленка влаги, в которой растворены кислород, двуокись углерода, двуокись серы, окислы азота, сероводород и другие газы, а также соли кислот и щелочей. В ре-

зультате данного взаимодействия на поверхностях деталей образуются химические соединения, которые из-за их меньшей по сравнению с основным материалом прочности разрушаются и удаляются с продуктами износа. Этот вид изнашивания подразделяется на окислительное и изнашивание при фреттинг-коррозии.

При **окислительном изнашивании** кислород воздуха или содержащийся в смазке образует на поверхности металла окисную пленку, которая при трении разрушается. На обнажившихся чистых поверхностях металла вновь образуются и разрушаются пленки окислов, и в него вступают новые, нижние слои металла. Продукты износа состоят из этих окислов. Окислительное изнашивание относится к допустимым формам изнашивания с постепенным разрушением поверхностей трения деталей. Процесс такого изнашивания характеризуется относительно невысокой скоростью (0,05—0,1 мкм/ч) и активизируется с повышением температуры и влажности в зоне трения.

Изнашивание при фреттинг-коррозии — это коррозионно-механическое изнашивание контактирующих тел при их малых колебательных перемещениях при наличии в зоне контакта окисляющей среды. На соприкасающихся поверхностях вначале возникают окисные пленки, которые при относительных колебательных перемещениях разрушаются.

Необходимым условием возникновения фреттинг-коррозионного изнашивания является относительное проскальзывание сопряженных поверхностей, которое вызывается сопровождающими работу машины вибрациями или периодическими деформациями деталей. Процесс изнашивания при фреттинг-коррозии сопровождается многократным деформированием контактирующих микронеровностей, их химическим разупрочнением, схватыванием и последующим усталостным разрушением поверхностного слоя. Этот вид изнашивания наблюдается на сопряженных поверхностях вращающихся валов с напрессованными на них кольцами подшипников качения, дисками колес и муфтами; в шлицевых, шпоночных, винтовых, болтовых и заклепочных соединениях; на опорных поверхностях рессор, пружин, подвесок и мостов автомобиля; на опорах двигателей, коробок передач, кузовов и кабин.

Процесс повреждения деталей при фреттинг-коррозии является достаточно сложным и включает три стадии развития. В начальный период при возникновении проскальзывания сопряженных поверхностей под воздействием высоких нагрузок происходят упрочнение

материала и пластическое деформирование микронеровностей. Возникают схватывания чистых участков металла, появление и разрушение окисных пленок. Этот период характеризуется повышенной интенсивностью изнашивания, которая постепенно снижается.

Второй период фреттинг-коррозии характеризуется развитием коррозионно-усталостных процессов под воздействием кислорода воздуха и влаги. Изнашивание связано с образованием и разрушением окисных пленок, которые не удаляются из зоны контакта. Процесс изнашивания в этот период стабилизируется, скорость изнашивания поверхностных слоев по сравнению со скоростью первого периода невелика.

Третий период фреттинг-коррозии связан с разрушением поверхностных слоев, предварительно разрыхленных коррозионными и усталостными процессами. В зоне контакта образуется повышенное количество продуктов износа, что способствует интенсификации процессов разрушения вплоть до возникновения абразивного изнашивания. При эксплуатации машин этот период фреттинг-коррозии является недопустимым.

Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии зависит от параметров контактного взаимодействия поверхностей: амплитуды и частоты относительных перемещений; количества циклов нагружения; состава и температуры внешней среды; наличия и качества смазки; прочностных характеристик контактирующих материалов.

Изнашивание при фреттинг-коррозии характеризуется малыми скоростями относительного перемещения контактирующих поверхностей (до 3 мм/с) и очень малыми амплитудами скольжения. Для возникновения фреттинг-коррозионного изнашивания достаточно появления колебательных относительных перемещений контактирующих поверхностей с амплитудой скольжения, равной $8 \cdot 10^{-7}$ мм. При увеличении амплитуды скольжения прямо пропорционально возрастает скорость фреттинг-коррозионного изнашивания. С дальнейшим увеличением амплитуды скольжения фреттинг-коррозионное изнашивание преобразуется в обычное окислительное или усталостное.

Существенное влияние на процесс изнашивания при фреттинг-коррозии оказывает давление на контактирующие поверхности (рис. 3.6). С увеличением давления до определенной величины (участок 1) интенсивность изнашивания возрастает, с дальнейшим увеличением давления (участок 2) начинает уменьшаться. Поэтому для

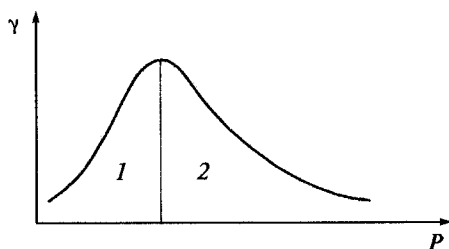


Рис. 3.6. Зависимость интенсивности изнашивания при фреттинг-коррозии от давления на поверхности трения

снижения интенсивности изнашивания при фреттинг-коррозии и предотвращения относительного перемещения поверхностей увеличивают натяг в прессовых посадках.

Внешним проявлением фреттинг-коррозионного изнашивания являются натирсы поверхностей, налипание металла, вырывы или раковины, заполненные порошкообразными продуктами коррозии, поверхностные микротрещины. В отличие от других видов изнашивания продукты износа при фреттинг-коррозии в большинстве случаев не удаляются из зоны контакта рабочих поверхностей и играют роль абразивных частиц, интенсифицируя процессы разрушения.

Каждый из рассмотренных видов изнашивания редко встречается в чистом виде — обычно они проявляются комплексно. Например, рабочие поверхности гильз цилиндров подвергаются как абразивному, так и молекулярно-механическому и коррозионно-механическому видам изнашивания. Любой из них может оказаться ведущим или сопутствующим в зависимости от условий и режимов работы двигателя.

3.2. Закономерности изнашивания деталей

В процессе эксплуатации машин количественные характеристики изнашивания деталей и сопряжений изменяются во времени. В общем случае изнашивание может быть представлено в виде стадийного процесса, имеющего три характерных периода (рис. 3.7).

В первый период t_n осуществляется микро- и макрогеометрическая приработка поверхностей трения деталей, и в некоторой степени стабилизируются показатели их технического состояния. Происходит

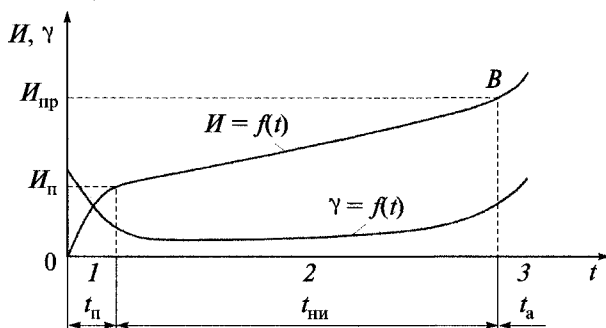


Рис. 3.7. Кривая изнашивания деталей машин:

$I_{\text{п}}$ — износ за период приработки; $I_{\text{пр}}$ — предельный износ; $I = f(t)$ — кривая изнашивания; $\gamma = f(t)$ — скорость изнашивания; $t_{\text{п}}$ — первый период изнашивания; $t_{\text{нн}}$ — период нормального изнашивания; $t_{\text{а}}$ — период аварийного изнашивания

разрушение микронеровностей поверхностей трения деталей. Во второй период скорость изнашивания монотонно убывает до значения $\gamma = \text{const}$, характерного для периода установившегося (нормального) изнашивания $t_{\text{нн}}$. Если нет причин, изменяющих параметры установившегося процесса изнашивания, то он протекает стационарно, и возможные отклонения от средней скорости процесса за счет его стабильности не влияют на общую линейную зависимость износа от наработки.

Третий период характеризует наступление аварийного изнашивания $t_{\text{а}}$, когда резко возрастает интенсивность процесса. Его наступление связано, как правило, с изменением вида изнашивания в результате активизации факторов, влияющих на процесс и зависящих от степени износа. Возникают ударные нагрузки, биение, изменение теплового режима и условий смазки. Происходит рост микронеровностей, появляются условия для схватывания и молекулярно-механического изнашивания.

Интенсивность отказов резко возрастает, а вероятность безотказной работы снижается до минимума. Эксплуатация машин в этот период становится нерентабельной из-за резкого роста затрат на поддержание их в технически исправном состоянии и даже опасной из-за недостаточной прочности деталей.

Кривая изнашивания в большинстве случаев совпадает с закономерностями возникновения отказов машин. Параметр потока отказов, например, в общем случае также является функцией времени — он за-

висит от того периода наработки, в пределах которого оценивается его значение (см. рис. 1.6).

В период приработки параметр потока отказов деталей ω достаточно высок и обусловлен в основном качеством их изготовления. На участке кривой 2 поток отказов стабилизируется на минимальном уровне и становится стационарным ($\omega = \text{const}$), его значение практически не изменяется до наступления аварийного изнашивания (участок 3), когда параметр потока отказов резко возрастает.

На продолжительность периода приработки оказывают влияние точность обработки сопряженных поверхностей, их шероховатость, геометрическая форма конструкции узла и другие факторы.

Под *приработкой* понимается процесс изменения геометрических параметров поверхностей и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период изнашивания. Период приработки характеризуется интенсивным разрушением микрообъемов поверхности изнашивания, повышенным тепловыделением, изменением шероховатости.

Для большинства конструктивных элементов современных машин продолжительность этого периода незначительна (для автомобилей, например, она составляет 3–3,5 % их ресурса). За этот период устанавливается «равновесная» шероховатость, характерная для нормального периода изнашивания $t_{\text{ни}}$ и практически остающейся постоянной на всем протяжении этого периода. При этом исходная (начальная) шероховатость поверхностей не оказывает существенного влияния на равновесную установившуюся шероховатость (рис. 3.8).

Она может быть больше (R_1) или меньше (R_2), но после периода приработки становится одинаковой (R_p). При малой начальной шероховатости высота микронеровностей поверхности увеличивается в основном вследствие их молекулярного взаимодействия.

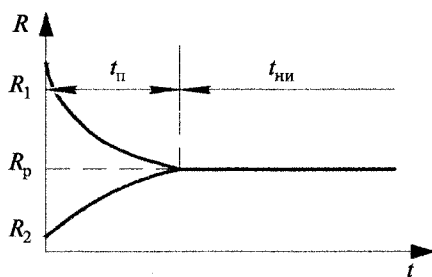


Рис. 3.8. Изменение шероховатости поверхностей за период приработки

Под действием сил молекулярного притяжения происходят разрушение и перенос материала с одной поверхности на другую, в результате чего формируется новый рельеф поверхности с шероховатостью, близкой к равновесной. Поэтому при изготовлении деталей необходимо стремиться к тому, чтобы исходная (технологическая) шероховатость их поверхностей была близкой к равновесной, характерной для нормального периода изнашивания. Это сводит к минимуму период приработки деталей и существенно повышает их долговечность.

3.3. Количественные характеристики процесса изнашивания

Для оценки процесса изнашивания деталей машин используются следующие три показателя: износ, скорость изнашивания и интенсивность изнашивания.

Под **износом** понимается результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. В зависимости от конструктивных особенностей деталей износ может оценивать изменение под действием сил трения их геометрических размеров (линейный износ), массы (весовой износ) или объема (объемный износ), измеряемое в соответствующих единицах: метрах (м), граммах (г), кубических метрах (м³). Для транспортных машин величину износа оценивают в основном в микрометрах (1 мкм = 10⁻⁶ м).

Скорость изнашивания γ представляет собой отношение износа U , возникшего за определенный интервал времени t , к величине этого интервала (в часах)

$$\gamma = U/t. \quad (3.2)$$

Интенсивность изнашивания J — это отношение износа U к обусловленному пути трения L , на котором он произошел. Если износ и путь трения измеряются в одинаковых единицах, то интенсивность изнашивания является безразмерной величиной

$$J = U/L. \quad (3.3)$$

Изнашивание деталей происходит преимущественно в период установившегося режима эксплуатации машин (для автомобилей, на-

пример, этот период составляет 95 % их ресурса). В этот период скорость изнашивания γ примерно постоянна (см. рис. 3.7), поэтому зависимость между величиной износа и наработкой является линейной

$$I = \gamma t, \quad (3.4)$$

где I — линейный износ, т. е. изменение размера детали, измеренное в направлении, перпендикулярном поверхности трения; γ — скорость изнашивания; t — наработка.

С учетом приработки эта зависимость выглядит следующим образом:

$$I = I_n + \gamma t, \quad (3.5)$$

где I_n — величина износа за период приработки.

3.4. Предельные и допустимые износы

В процессе эксплуатации машин или при проведении ремонтных работ по восстановлению их утраченной работоспособности большое значение имеет установление предельных и допустимых износов деталей.

Предельное значение износа соответствует состоянию изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или экономически нецелесообразна. Такая величина износа характеризует выход изделия из области работоспособности. Это может относиться как к машине в целом, так и к ее агрегатам, узлам и деталям. Так, например, необходимость выполнения регулировочных работ обуславливается достижением предельных зазоров в сопряжениях; замена масел в агрегатах связана с их старением и изменением смазочных и других эксплуатационных свойств; замена или ремонт детали диктуется износом хотя бы одной ее рабочей поверхности до предельного значения.

Определение предельного износа является сложной задачей, так как при конструировании, как правило, назначаются допустимые пределы изменения выходных параметров только для машины в целом или для ее отдельных агрегатов. Однако объективная оценка надежности сложного изделия требует установления предельных норма-

тивов для всех элементов и деталей, от которых зависит работоспособность этого изделия.

Предельное состояние машины или агрегата назначается в основном исходя из допустимых отклонений выходного параметра на основании данных эксплуатации и ремонта.

Известно, например, что в эксплуатации автомобиль подвергается непрерывному процессу изменений и отклонений от начальных параметров. Изменение размеров и геометрии деталей ведет к нарушению нормальных сопряжений, т. е. к увеличению зазоров, которые, в свою очередь, способствуют еще большему ускорению процесса изнашивания. Все это приводит к тому, что выходные параметры автомобиля ухудшаются.

Отклонение их от допустимых значений и может служить в качестве оценки для определения предельного состояния. Износ, например, таких деталей, как гильзы цилиндров, поршни, поршневые кольца, коленчатый вал и другие трущиеся детали двигателей, неизбежно приводит к снижению эффективной мощности и повышению удельного расхода топлива.

Анализ износа деталей двигателя в реальных условиях эксплуатации показывает, что между величиной износа, мощностью и расходом топлива существует определенная зависимость (рис. 3.9). До некоторой степени износа эффективная мощность возрастает, а удельный расход топлива снижается. С дальнейшим увеличением износа эффективная мощность плавно снижается, а удельный расход топлива, наоборот, повышается.

В первом периоде работы двигателя (участок $0—I_{II}$), периоде приработки деталей, коэффициент трения большой и потери мощно-

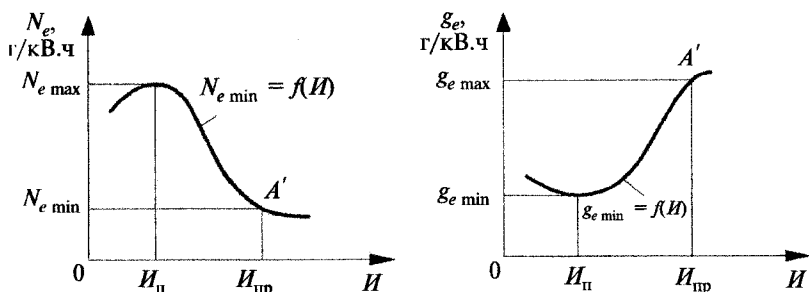


Рис. 3.9. Графики изменения эффективной мощности N_e и удельного расхода топлива g_e от степени износа двигателя

сти на работу сил трения максимальные. По мере приработки деталей потери мощности на преодоление внешнего трения снижаются, эффективная мощность при всех прочих равных условиях работы двигателя повышается.

После завершения процесса приработки дальнейшая работа двигателя приводит к увеличению зазора между цилиндрами и сопряженными с ними деталями с неизбежной потерей компрессии. С этого момента дальнейшее изнашивание деталей сопровождается снижением эффективной мощности двигателя и повышением удельного расхода топлива. При достижении предельного износа эффективная мощность двигателя имеет минимально допустимое значение, а удельный расход топлива — максимально допустимый.

Точка A' и определяет предельный износ двигателя, соответствующий $N_{e \min}$ и $g_{e \max}$. Дальнейшая работа автомобиля с таким двигателем становится нерентабельной.

Таким образом, технические условия на выходные параметры различных машин и агрегатов служат основой для назначения допусков на предельные состояния для узлов и деталей, входящих в изделие. При оценке работоспособности агрегата, механизма, узла необходимо установить предельно допустимые значения износов их деталей и сопряжений.

Нормативы предельных износов в настоящее время имеются, как правило, для весьма ограниченной номенклатуры деталей. При этом часто они недостаточно обоснованны, поэтому на практике при каждом ремонте машин приходится решать, пригодна деталь для дальнейшей эксплуатации, или она подлежит замене или восстановлению.

Из анализа кривой, выражающей в общем виде процесс изнашивания детали (см. рис. 3.7), ее предельный износ определяется критической точкой B .

Установление этой точки имеет очень большое практическое значение. Если деталь или группа деталей, принадлежащих одному агрегату, в результате изнашивания достигнет критической точки B и агрегат не будет отправлен в ремонт, то прогрессирующая скорость изнашивания неизбежно приведет к поломке как данной детали, так и других сопряженных с ней. Это повлечет за собой отказ агрегата в целом со всеми возможными последствиями (увеличением объема ремонтных работ; вероятностью возникновения ДТП, если он относится к узлам, влияющим на безопасность движения).

Однако отправка агрегата в ремонт значительно раньше момента наступления предельного состояния приведет к недоиспользованию его ресурса.

Для современных машин часто целесообразно устанавливать нормативы на предельные состояния не только по выходным параметрам, но и по степени повреждения их отдельных элементов. Так, на целый ряд деталей и агрегатов автомобиля предельные состояния устанавливают по износу, деформациям, величине возникающих трещин, изменениям геометрической формы и т. д.

Техническое состояние двигателя, например, определяется износом и изменением геометрической формы деталей кривошипно-шатунного механизма. Поэтому прежде всего необходимо установить критерии предельного состояния деталей именно этих сопряжений (вкладышей подшипников, шеек коленчатого вала, гильз цилиндров, поршней, поршневых колец).

За критерий предельного состояния вкладыша целесообразно принимать начало разрушения антифрикционного слоя. В связи с этим если при замене поршневых колец или в каких-либо других случаях вынужденного вскрытия подшипников обнаружится, что антифрикционный слой начинает выкрашиваться, вкладыш необходимо заменить.

За параметр предельного состояния шеек коленчатого вала принимают износ и не учитывают изменение их геометрической формы. Однако, как показывают исследования [1], изменение геометрической формы шеек (в основном некруглости) существенно снижает долговечность сопряжения. Например, увеличение некруглости шейки в два раза (по сравнению с номинальной) снижает наработку вкладыша до начала разрушения в несколько раз. Поэтому наряду с нормативами износов шеек коленчатого вала следует учитывать и отклонения от геометрической формы.

Критерием предельного состояния гильзы цилиндров может служить, главным образом, изменение их геометрической формы, так как радиальный износ в сопряжении кольцо—гильза неравномерный. При этом увеличивается зазор между поршневым кольцом и гильзой, что приводит к увеличению утечки газов в картер и снижению мощности и экономичности двигателя.

Таким образом, предельную величину износа детали необходимо устанавливать с учетом характера процесса ее изнашивания.

При ремонте машин наряду с предельными весьма существенное значение имеет установление допустимых износов деталей и узлов.

Допустимый — это такой износ изделия, при котором оно не может выйти из строя в течение очередного межремонтного периода.

Его значение может быть установлено при известной кривой изнашивания и установленного норматива предельного износа детали (рис. 3.10).

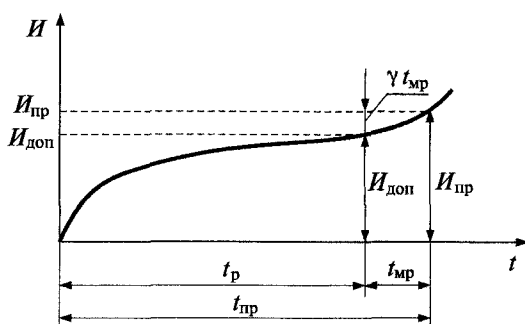


Рис. 3.10. Схема определения допустимого износа

Наработка детали до предельного состояния $t_{пр}$ определяется по формуле

$$t_{пр} = \frac{I_{пр}}{\gamma}, \quad (3.6)$$

где $I_{пр}$ — предельное значение износа; γ — скорость изнашивания.

За время межремонтного периода $t_{мр}$ износ детали изменится на величину

$$I_{мр} = \gamma t_{мр}. \quad (3.7)$$

Допустимое значение износа $I_{доп}$, начиная с которого необходимо ремонтировать деталь при известной межремонтной наработке $t_{мр}$, будет равно

$$I_{доп} = I_{пр} - \gamma t_{мр}. \quad (3.8)$$

Учитывая, что скорость изнашивания может быть выражена соотношением $\gamma = I_{доп}/t_{р}$, где $t_{р}$ — наработка детали до выполняемого в данный момент ремонта, получим:

$$I_{доп} = I_{пр} - \frac{I_{доп} t_{мр}}{t_{р}} = \frac{I_{пр}}{1 + \frac{t_{мр}}{t_{р}}}. \quad (3.9)$$

Если с начала эксплуатации данный ремонт не первый, а k -й, то $t_p = kt_{\text{мр}}$. Тогда допустимый износ будет равен

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пр}}}{1 + t_{\text{мр}}/kt_{\text{мр}}} = \frac{k}{k+1} I_{\text{пр}}. \quad (3.10)$$

Следует отметить, что эта формула будет корректной при условии, что скорость изнашивания поверхности трения детали $\gamma = \text{const}$, т. е. при нормальном режиме изнашивания.

Пример. Деталь поступила в ремонт с текущим значением износа $I_{\text{ф}} = 0,09$ мм. Необходимо определить, требуется ли ее восстановление, если предельный износ $I_{\text{пр}} = 0,12$ мм, и этот ремонт второй с начала эксплуатации, т. е. $k = 2$.

По формуле (3.10) определяем допустимый износ

$$I_{\text{доп}} = \frac{2}{2+1} 0,12 = 0,08 \text{ мм.}$$

Следовательно, деталь необходимо восстанавливать, так как ее фактический износ превышает допустимый.

Определение допустимых зазоров сопряжений может быть представлено схемой (рис. 3.11). Если известны экспериментальные кривые износа двух сопряженных деталей и величина предельного зазора, то допустимое значение зазора, при котором сопряжение не теряет работоспособность в течение очередного межремонтного периода, находится следующим образом.

Влево от вертикали I—I, определяющей предельное состояние сопряжения, откладывается значение межремонтной наработки $t_{\text{мр}}$ и проводится вертикаль II—II. Величина $S_{\text{доп}}$, соответствующая размеру между кривыми изнашивания первой и второй деталей, и будет соответствовать значению допустимого зазора в сопряжении.

Если фактическое значение зазора $S_{\text{ф}} \leq S_{\text{доп}}$, то такое сопряжение восстанавливать нецелесообразно, так как оно проработает в течение $t_{\text{мр}}$ без потери работоспособности. Если $S_{\text{ф}} > S_{\text{доп}}$, сопряжение нуждается в проведении ремонтных операций.

Пересечение вертикали II—II с линиями износа деталей 1 и 2 и линиями начального зазора сопряжения $S_{\text{нач}}$ соответствует допустимым износам этих деталей. Если одна из деталей сопряжения имеет

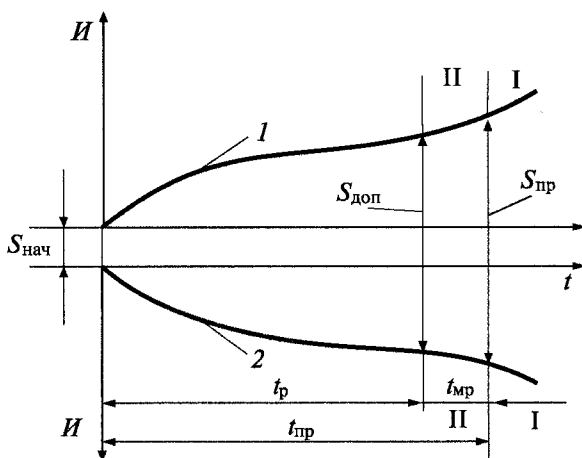


Рис. 3.11. Схема определения допустимого зазора в сопряжении:

$S_{\text{нач}}$ — начальный зазор в сопряжении; $t_{\text{пр}}$ — наработка до предельного состояния сопряжения; $t_{\text{р}}$ — наработка с начала эксплуатации до данного ремонта

больший предельный и, соответственно, допустимый износ, то восстановление работоспособности такого сопряжения возможно за счет ремонта или замены только одной детали.

3.5. Методы измерения износа деталей и сопряжений

Основными методами количественной оценки износа деталей и сопряжений являются эмпирические методы, основанные на измерении степени их повреждения. Объективность и достоверность таких оценок зависит, главным образом, от характера контакта трущихся поверхностей и их относительных перемещений.

Если, например, при контакте поверхностей нет относительного перемещения, то это вызывает, как правило, их *смятие* (пластическую деформацию). Смятие поверхностей является характерным видом разрушения шпоночных, шлицевых и резьбовых соединений, упоров и штифтов.

Относительное скольжение поверхностей вызывает их *износ*. При этом влияние пластических деформаций, сопровождающих изнашивание, может быть уменьшено или полностью устранено путем повышения твердости элементов пар трения.

При малых относительных колебательных перемещениях сопряженных деталей возникает специфический вид изнашивания — *фреттинг-коррозия*.

Качение без скольжения, т. е. обкатка двух тел, вызывает усталость поверхностных слоев, которая проявляется в виде отслаивания мелких частиц металла с поверхности контакта. Такой вид изнашивания характерен для подшипников качения, роликов кулачковых механизмов и других деталей автомобиля. При недостаточной твердости материалов и больших удельных давлениях усталостное изнашивание может сопровождаться пластической деформацией.

При качении с относительным скольжением, как это имеет место в зубчатых передачах, наблюдаются и *износ*, и *усталость*, а в ряде случаев — и *смятие* поверхности (рис. 3.12). Зона усталости расположена там, где относительное скольжение минимально или равно нулю (зона начальной окружности зуба). Зона более интенсивного износа расположена в местах большего относительного скольжения (головка и ножка зуба).

Таким образом, каждому виду взаимодействия поверхностей соответствует характерный вид повреждения. Сложность количественной оценки степени повреждения деталей усугубляется еще и тем, что оно может распространяться на весь объем материала (или на всю поверхность) детали, а может носить локальный характер.

При выборе методов и средств измерения износа необходимо учитывать совокупность метрологических, эксплуатационных и экономических показателей. К метрологическим показателям относятся: допустимая погрешность измерительного прибора, цена деления шкалы, порог чувствительности, пределы измерения и др. Эксплуатационные и экономические показатели — стоимость и надежность измерительных средств, срок их службы, трудоемкость измерения и т. д.

Все методы оценки степени повреждения деталей подразделяются на две группы: *дифференциальные* и *интегральные*. В первом случае выбираются численные критерии для непосредственного измерения величины повреждения. Так, например, измеряются износы, деформации, глубина и размеры каверн и т. д. Из наиболее известных дифференциальных методов измерения следует прежде всего отметить

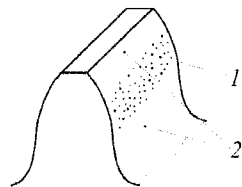


Рис. 3.12. Изнашивание зуба шестерни:
1 — зона наибольшего изнашивания; 2 — зона усталостного изнашивания

методы микрометрирования, снятия профилограмм, искусственных баз, активации рабочих поверхностей деталей.

С помощью интегральных методов определяется общий (суммарный) износ деталей сопряжения или сборочной единицы в целом. Наиболее широкое распространение из них получили такие методы, как измерение износов по содержанию металлических примесей в пробе масла и по изменению выходных параметров функционирования узлов и механизмов машин.

Метод микрометрирования основан на измерении детали до и после цикла испытаний с помощью штангенинструментов, микрометров, индикаторов или других приборов, точность которых обычно находится в пределах 1—10 мкм. Для повышения точности микрометрических измерений в лабораторных условиях широко используются разнообразные по конструктивному исполнению и принципу действия оптико-механические приборы. Повышение точности измерений этих приборов достигается либо сочетанием механических передаточных механизмов с оптическим устройством (оптиметры), либо благодаря значительному увеличению измеряемых объектов или шкал (микроскопы, проекторы и др.).

Метод относится к традиционным методам измерения размеров. К его достоинствам следует отнести простоту и несложность используемого инструмента. К недостаткам метода относятся:

- невозможность измерения износа в процессе работы машины и необходимость, как правило, частичной разборки узла и демонтажа измеряемой детали;
- изменение размера может быть следствием не только изнашивания поверхности, но и результатом деформации (измерение износа в этом случае носит условный характер).

Метод профилографирования получил широкое распространение для оценки износа рабочих поверхностей деталей при испытаниях машин. Этот метод используется в основном при исследовательских испытаниях и позволяет с большой степенью точности оценить распределение износа по всему профилю поверхности контролируемой детали. В качестве средств измерения применяются различные профилографы и профилометры. *Профилографы* регистрируют координаты профиля поверхности на записывающем приборе. *Профилометры* измеряют параметры профиля поверхности и фиксируют их на шкале. В некоторых моделях профилографы и профилометры объединяют в одном приборе.

На рис. 3.13 показана схема прибора для бесконтактного измерения износа профиля рабочей поверхности детали. Оптическая часть прибора включает в себя лазер 1, линзы фокусировки 2 и 4, призму 3, фотоприемник 5. Электронная часть содержит усилитель сигнала фотоприемника 8, микроконтроллер 7, блок наведения фокуса 9, а также устройство визуального отображения параметров измерения 6.

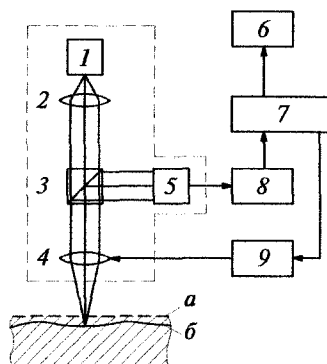


Рис. 3.13. Схема прибора для бесконтактного измерения профиля рабочей поверхности детали:

a, б — профили поверхности до и после заданного периода эксплуатации; 1 — лазер; 2, 4 — линза фокусировки; 3 — призма; 5 — фотоприемник; 6 — устройство визуального отображения параметра измерения; 7 — микроконтроллер; 8 — усилитель сигнала фотоприемника; 9 — блок наведения фокуса

С помощью этого метода измеряют износы стенок цилиндров двигателя, поршневых пальцев, отверстий в бобышках поршней, шеек коленчатых и распределительных валов и других деталей. Оценка степени повреждения производится путем совмещения профилограмм, снятых с поверхности детали до и после цикла испытаний (рис. 3.14).

Отклонение в размерах между профилограммами показывает не только величину, но и распределение износа по профилю рабочей поверхности, что очень важно при разработке мероприятий по повышению износостойкости деталей.

Метод искусственных баз заключается в том, что на поверхности трения выдавливают или вырезают углубление заданной геометрической формы и по уменьшению размеров этого углубления судят о величине износа. В зависимости от способа нанесения углубления чаще всего применяются методы отпечатков или вырезанных лунок.

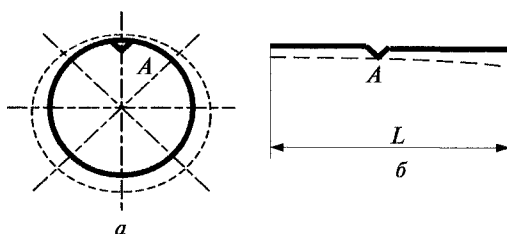


Рис. 3.14. Совмещение профилограмм:

a — гильзы цилиндров двигателя; b — шейки вала в продольном сечении;
 A — метка для совмещения; L — длина измеряемого участка; исходный профиль;
 - - - - - профиль после цикла испытаний

Метод отпечатков предусматривает нанесение на изнашиваемую поверхность углубления с помощью алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине между противоположными гранями $\alpha = 136^\circ$ (рис. 3.15, a).

Пирамида вдавливается в испытуемую поверхность под нагрузкой P с помощью прибора, используемого при определении твердости материала по Виккерсу. По изменению значения диагонали отпечатка до и после определенного периода изнашивания ($l_0 - l_1$) судят о величине износа, который может быть определен по формуле:

$$H = h_0 - h_1 = \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} (l_0 - l_1). \quad (3.11)$$

К недостаткам метода отпечатков относятся местное вспучивание металла вокруг углубления, которое требует зачистки, и некоторое восстановление углубления после снятия нагрузки, что вносит определенную погрешность при измерении износа.

Метод вырезанных лунок лишен этих недостатков. Лунка на поверхности трения детали вырезается с помощью вращающегося алмазного резца, и по уменьшению ее размеров судят о величине износа (рис. 3.15, b). Величина износа измеряется такими приборами, как УПОИ-6, оптико-механический индикатор износа ОМИ-1 и др. Для плоских поверхностей значение износа определяется из выражения:

$$H = 0,125 (l_0^2 - l_1^2) / r. \quad (3.12)$$

Для цилиндрических поверхностей:

$$H = 0,125 (l_0^2 - l_1^2) (1/r \pm 2/R), \quad (3.13)$$

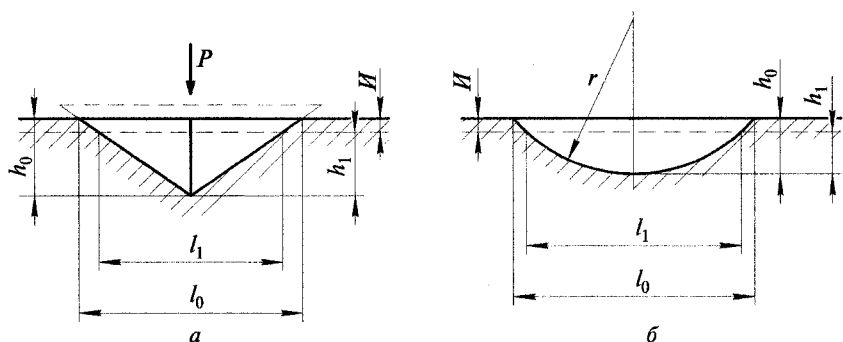


Рис. 3.15. Схема измерения износа методом искусственных баз:

a — выдавливание алмазной пирамидой; b — вырезание лунки вращающимся резцом; P — усилие вдавливания; r — радиус лунки; h_0 и h_1 — начальная и конечная глубина углубления; l_0 и l_1 — начальная и конечная длина лунки

где R — радиус кривизны цилиндрической поверхности трения; «+» — для выпуклых поверхностей; «-» — для вогнутых поверхностей.

Метод искусственных баз позволяет с высокой степенью точности (1,25—2 мкм) определить величину износа или интенсивность изнашивания при значительно меньших наработках по сравнению с методом микрометрирования.

Метод поверхностной активации при оценке износа заключается в том, что небольшой участок поверхности исследуемой детали подвергается радиоактивному облучению (обычно это пятно диаметром 5 мм и глубиной 0,05—0,4 мм). В процессе испытаний по мере изнашивания детали пропорционально снижается радиоактивное излучение, которое измеряется специальным счетчиком.

Величина износа детали определяется по тарифовочному графику сопоставлением снижения радиоактивности детали и образца. При этом в результат измерения вносятся ряд поправок, связанных с наличием радиоактивного космического фона и естественным распадом радиоактивных изотопов.

При исследовании изнашивания крупногабаритных деталей используются также специальные активированные вставки в изнашивающиеся поверхности, близкие по своим фрикционным характеристикам с материалом детали.

Метод поверхностной активации используется для контроля износа деталей при стендовых и дорожных испытаниях без остановки и

разборки машины. Его применение позволяет измерять малые износы, что существенно сокращает продолжительность износных испытаний, исследовать динамику изнашивания, автоматизировать операции контроля. Небольшой уровень радиации не требует специальной радиационной защиты.

Метод измерения износа по содержанию продуктов изнашивания в масле используется для оценки *интегрального* износа различных узлов машин, двигателей внутреннего сгорания, зубчатых передач и т. д. Метод основан на взятии пробы в отработанном масле, где накопились продукты износа, представляющие собой металлические частицы и окислы металлов с активными компонентами смазки.

При отборе пробы необходимо, чтобы она характеризовала среднее содержание продуктов изнашивания в масле. Концентрация продуктов износа в масле картера двигателя, например, $K_{\text{пи}}$ через определенную продолжительность работы стабилизируется на уровне

$$K_{\text{пи}} = \frac{q}{q_{\text{ф}} + q_{\text{у}}}, \quad (3.14)$$

где q , $q_{\text{ф}}$, $q_{\text{у}}$ — соответственно, интенсивность поступления продуктов изнашивания в масло, интенсивность их задержки фильтрующими элементами и интенсивность их убывания из-за угара масла.

Для объективной оценки степени износа целесообразно иметь для каждого типа двигателя зависимость изменения концентрации $K_{\text{пи}}$ по наработке (рис. 3.16).

Кривая показывает, что в период приработки интенсивность изнашивания постепенно уменьшается и на определенной наработке

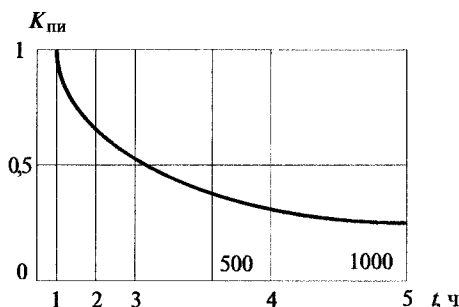


Рис. 3.16. Изменение концентрации продуктов изнашивания двигателя в масле: 1 — новый двигатель; 2 — после наработки 100 ч; 3 — после наработки 300 ч; 4 — после наработки 600 ч; 5 — после наработки 1000 ч

стабилизируется. Для получения достоверных результатов пробы масла должны отбираться на прогретом двигателе, не позднее, чем через 20 мин после его остановки.

Для анализа продуктов изнашивания в масле используют различные методы (химические, спектральные, радиометрические, активационные, оптико-физические).

Химический метод основан на оценке содержания металлических частиц износа в золе сожженной пробы масла. Метод достаточно сложен и трудоемок, поэтому применяется при измерении износа редко.

Спектральный метод основан на определении содержания продуктов изнашивания по спектральному анализу пламени сгораемой пробы масла. Метод характеризуется высокой трудоемкостью, сложностью, необходимостью наличия высококвалифицированного персонала.

Радиометрический метод основан на измерении радиоактивных продуктов изнашивания в масле, являющихся результатом износа деталей облученных радиоактивными изотопами.

Активационный метод представляет собой комбинацию спектрального и радиометрического методов. Содержание продуктов изнашивания в масле определяется по их радиоактивности посредством анализа спектров гамма-излучения пробы после ее облучения нейтронами.

В последние годы при оценке износа все шире применяются *оптико-физические методы*. Содержание продуктов изнашивания в масле определяется с использованием современных приборов, которые автоматически регистрируют механические частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в прозрачной жидкости.

Недостатком рассмотренных методов определения износа по содержанию продуктов изнашивания в пробе отработанного масла является высокая стоимость используемого оборудования, а также невозможность оценки износа одной конкретной детали.

Метод определения износа по изменению выходных параметров функционирования не требуют разборки изделий и поэтому весьма перспективен для оценки их технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Так, например, о степени повреждения многих узлов трения можно судить по возрастанию температуры и коэффициента трения. Степень износа цилиндропоршневой группы двигателя оценивают по угару масла, падению давления в конце такта сжатия (компрессии), изменению состава отработавших газов и др.

О процессе изменения технического состояния гидро- и пневмоаппаратуры из-за изнашивания деталей и увеличения зазоров судят по герметичности (возрастанию утечек) — основному выходному параметру таких устройств.

Таким образом, метод позволяет оценить значения износов или других повреждений изделия по изменению его выходных параметров, минуя этап их непосредственного измерения (рис. 3.17).

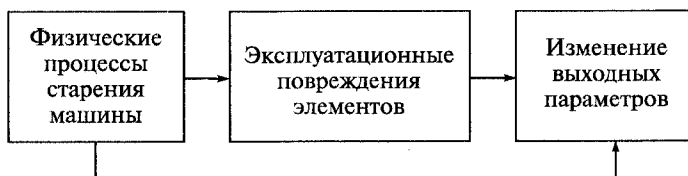


Рис. 3.17. Схематичное изображение оценки степени повреждения по изменению выходных параметров

Для повышения точности и достоверности оценки степени повреждения сложных изделий с использованием этого метода рекомендуется контролировать не один, а несколько выходных параметров. Например, при оценке технического состояния насоса в результате износа ряда его элементов (плунжеров, клапанов и др.) измеряют такие его выходные параметры, как производительность; давление, развиваемое на выходе; равномерность подачи жидкости.

Вопросы для самопроверки

1. Какие виды изнашивания возникают в деталях машин?
2. В результате каких физических процессов происходит механическое изнашивание?
3. Приведите примеры основных видов механического изнашивания.
4. Какие формы абразивного изнашивания возникают при трении сопряженных поверхностей?
5. Объясните сущность гидроабразивного и газоабразивного изнашивания.
6. Что понимается под усталостным изнашиванием деталей?
7. Раскройте сущность молекулярно-механического изнашивания.
8. Какие физические процессы приводят к коррозионно-механическому изнашиванию?

-
9. Что понимается под изнашиванием при фреттинг-коррозии? Для каких конструктивных элементов оно характерно?
 10. Какие стадии включает классическая форма кривой изнашивания?
 11. Какими показателями оценивается процесс изнашивания?
 12. Как определяются предельные и допустимые износы деталей и сопряжений?
 13. Назовите основные методы определения степени износа.
 14. Раскройте сущность измерения износа методами снятия профилограмм и искусственных баз.
 15. Как определяется степень износа по изменению выходных параметров?

Глава 4

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ

На процесс изнашивания конструктивных элементов оказывают влияние внешние механические воздействия, факторы внешней среды и свойства материалов трущихся поверхностей.

Условно их можно подразделить на следующие группы:

- *конструктивные* (кинематические параметры сопряжения, вид трения и смазки рабочих поверхностей, механические характеристики материалов пар трения);
- *технологические* (структура и физико-механические свойства поверхности трения, наличие остаточных напряжений в поверхностном слое, макро- и микрогеометрия рабочих поверхностей);
- *эксплуатационные* (условия эксплуатации, качество эксплуатационных материалов, организация технического обслуживания и ремонта, квалификация персонала и т. д.).

4.1. Влияние на изнашивание давления и скорости относительного перемещения

Давление на поверхность трения и скорость относительного скольжения являются основными параметрами, связанными с конструкцией и кинематикой сопряжения. Изучение процесса изнашивания различных материалов в условиях граничного и близких к нему видов трения показывает, что в общем случае скорость изнашивания выражается зависимостью

$$\gamma = k P^m v^n, \quad (4.1)$$

где k — коэффициент, характеризующий износостойкость материалов пары трения и условий в зоне контакта (смазка, степень загрязне-

ния и др.); P — давление на поверхность трения; v — скорость относительного перемещения; m и n — постоянные, зависящие от условий трения.

В частности, для абразивного и ряда других близких к нему видов изнашивания $m = n = 1$, т. е. зависимость (4.1) в этом случае принимает линейный характер

$$\gamma = k P v. \quad (4.2)$$

Величина износа в зависимости от этих факторов будет тогда описываться выражением

$$И = \gamma t = k P v t = k P L, \quad (4.3)$$

где $L = vt$ — путь трения.

Все физические условия процесса изнашивания, кроме давления и скорости относительного перемещения (свойства материалов, смазка, температура и др.) в выражениях (4.1)—(4.3), учитываются коэффициентом k .

Линейный характер изнашивания сохраняется лишь в диапазоне нормального (стационарного) режима работы узла трения. Выход условий за пределы нормального изнашивания приводит или к неустойчивости процесса, или к повреждению (схватыванию поверхности, задиру и т. д.).

Для практических целей значения P и v должны выбираться из условия, что изнашивание возможно (допускается) только в условиях стационарного участка (участки 2 на рис. 4.1, *a* и 1 на рис. 4.1, *б*), когда скорость изнашивания примерно постоянна (устойчива) и минимальна по сравнению с ее величиной на других участках. При нормальной эксплуатации узлы трения работают исключительно в стационарной области (области нормального изнашивания). В то же

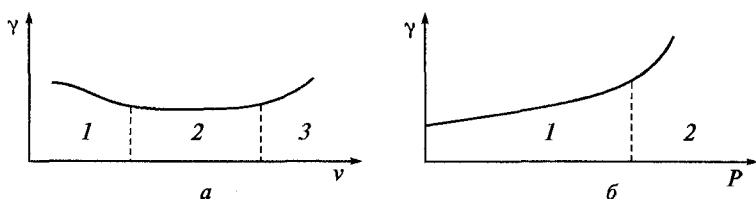


Рис. 4.1. Зависимости скорости изнашивания γ от скорости относительного скольжения v и давления P на поверхности трения

время вероятность нарушения нормальных условий на практике достаточно велика.

Основным признаком нормального изнашивания является то, что разрушение поверхности локализуется в тончайших поверхностных слоях вторичных структур, образующихся при трении в условиях динамического равновесия механического процесса образования и разрушения этих структур.

Из формулы (4.3) и рис. 4.1, *а* видно, что при нормальном режиме эксплуатации (участок 2) износ зависит не от скорости относительно скольжения, а от давления на поверхность трения P и пути трения L . Влияние скорости относительно скольжения сказывается лишь на температуре поверхности трения.

При малых скоростях скольжения (участок 1) и удельных давлениях, превышающих предел текучести, создаются условия для схватывания I рода с образованием локальных металлических связей и интенсивным пластическим деформированием вершин микронеровностей трущихся поверхностей. При больших скоростях скольжения (участок 3) возникают тепловые явления, интенсифицирующие адгезионное (молекулярное) взаимодействие трущихся поверхностей, с образованием металлических связей и переносом металла с одной (менее прочной) поверхности на другую (схватывание II рода).

4.2. Влияние на изнашивание температуры поверхности трения

В процессе работы сопряжений значительная часть потребляемой машиной энергии расходуется на выделение теплоты. Экспериментально установлено, что работа сил трения главным образом преобразуется в теплоту, и только незначительная ее часть потребляется трущимися поверхностными слоями деталей при их деформации и разрушении. Поэтому можно считать, что количество выделяемой теплоты от работы трения носит линейный характер.

Теплота, выделяемая при трении, частично расходуется на нагрев материала деталей, а частично поглощается окружающей средой. Изменение температуры поверхности трения Δt пропорционально при-

ращению количества теплоты ΔQ , приходящегося на единицу поверхности в единицу времени

$$\Delta t = c \Delta Q, \quad (4.4)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

Износ и интенсивность изнашивания для большинства материалов деталей с повышением температуры увеличиваются. Однако в некоторых пределах такое повышение вполне допустимо, если не нарушается установившееся коррозионно-механическое изнашивание. При нарушении нормальных условий трения, когда давление P и скорость относительного перемещения v выходят за пределы стационарного участка (см. рис. 4.1), происходит резкое изменение вторичных структур поверхностных слоев сопряженных деталей, смазывающей способности масла и, как следствие, увеличение интенсивности изнашивания.

Зависимость интенсивности изнашивания от температуры является довольно сложной. Для практических целей для граничного и близких к нему видов трения ее можно принять линейной [1]:

$$\Delta \gamma = b \Delta t; \quad \gamma = \gamma_0 + b \Delta t, \quad (4.5)$$

где $\Delta \gamma$, Δt — изменение интенсивности изнашивания и температуры, соответственно; b — коэффициент пропорциональности; γ_0 — интенсивность изнашивания при $\Delta t = 0$.

Для поверхностей, смазываемых под давлением, зависимость интенсивности их изнашивания с изменением температуры (например, масла в картере двигателя) Δt_1 отличается от линейной:

$$\gamma = \gamma_0 - b \Delta t_1 + c (\Delta t_1)^2, \quad (4.6)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

Существует оптимальная температура масла, при которой интенсивность изнашивания минимальна (рис. 4.2). При большем или меньшем ее значении интенсивность износа деталей возрастает.

Оптимальной температуре картерного масла соответствует оптимальное значение температуры поверхностей теплонагруженных деталей. При пониженных температурах деталей цилиндропоршневой группы интенсифицируются процессы коррозионно-механического изнашивания, поскольку на поверхностях конденсируются пары воды и кислот, образующихся в отработавших газах. В дальнейшем образующиеся пленки оксидов быстро разрушаются, так как их износостойкость на порядок ниже износостойкости материалов деталей

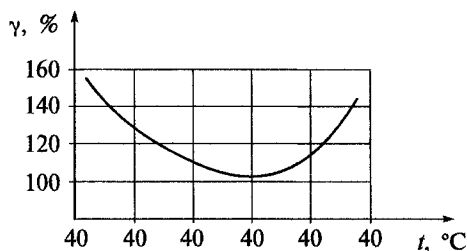


Рис. 4.2. Изменение интенсивности изнашивания цилиндров двигателя (расстояние 8 мм от верхней плоскости блока) в зависимости от температуры масла в камере t

двигателя. Кроме того, увеличение интенсивности изнашивания происходит вследствие того, что холодные моторные масла не образуют на трущихся поверхностях качественных масляных пленок.

Интенсивность изнашивания резко возрастает и с ростом температуры масла. Это происходит из-за того, что при высоких температурах ослабевают молекулярные связи в масле, нарушается их адсорбция на поверхности трения, в результате чего резко ухудшаются смазочные свойства. Таким образом, при изменении скоростных и нагрузочных режимов работы сопряжений изменяется температура в зоне трения и, как следствие, интенсивность изнашивания деталей. Поэтому для создания условий долговечной работы изделий необходимо постоянно следить за соблюдением режимов их работы, не допуская перегрузок.

4.3. Зависимость интенсивности изнашивания от вида трения

Изнашивание деталей всегда связано с их относительным перемещением и происходит при любом виде трения (скольжения, качения, качения с проскальзыванием). При этом трение в механизмах машин может играть как положительное, так и отрицательное значение. Положительную роль оно играет в таких элементах конструкций, как заклепочные и резьбовые соединения, тормозные механизмы, ременные и фрикционные передачи, принцип действия которых основан на использовании трения. Отрицательное влияние трения проявляется в двух формах: во-первых, как вредное сопротивление движению,

приводящее к бесполезному рассеиванию энергии и нагреву узлов трения; во-вторых, как изнашивание деталей.

Трение представляет собой сложный физико-химический процесс, зависящий от условий нагружения рабочих поверхностей деталей, свойств материала, из которого изготовлены сопряженные элементы, наличия и вида смазки, состояния поверхностей трущихся тел и т. п.

В зависимости от состояния поверхностей трущихся элементов и наличия смазки различают следующие виды трения скольжения (рис. 4.3):

- сухое, когда между поверхностями отсутствуют смазка и загрязнение поверхностей;
- граничное, возникающее при условии разделения трущихся поверхностей чрезвычайно тонким слоем смазки, не обладающим свойствами жидкости;
- жидкостное, когда рабочие поверхности полностью разделены слоем смазки.

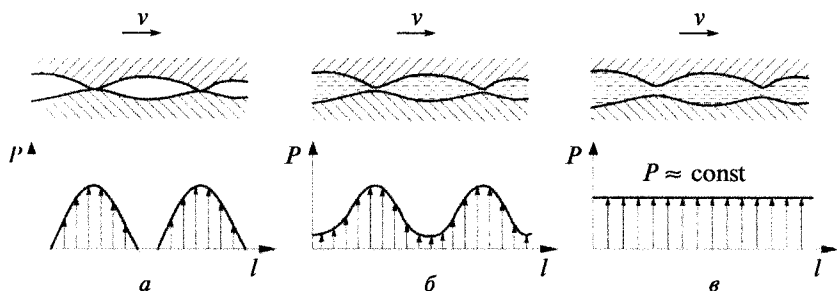


Рис. 4.3. Схематичное изображение основных видов трения:

a — сухое; b — граничное; $в$ — жидкостное

При **сухом трении** имеет место наибольшая скорость изнашивания, так как здесь создаются условия для возникновения молекулярного взаимодействия и таких явлений, как повышение температуры, концентрация давления P на отдельных участках, что интенсифицирует процесс разрушения поверхностных слоев.

На площадках контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые при отсутствии какой-либо вязкой прослойки (смазочного материала, влаги, загрязнений и т. д.) вызывают адгезию локальных участков и схватывание поверхностей. Сила

трения в этом случае зависит от площади зон схватывания и сопротивления материала их разъединению.

При **жидкостном трении** рабочие поверхности сопряженных деталей разделены слоем жидкостного смазочного материала, находящегося под давлением. Слой смазки уравнивает внешнюю нагрузку на поверхность трения и является при таком виде трения несущим. Он устраняет непосредственный контакт двух поверхностей, благодаря чему не только значительно уменьшаются силы трения, но и создаются условия для резкого уменьшения интенсивности изнашивания поверхностей.

При таком виде трения каждый участок поверхности нагружен постоянным давлением, не изменяющимся при относительном перемещении сопряженных деталей ($P = \text{const}$). Эта нагрузка не в состоянии разрушить микронеровности поверхности детали, так как возникающие напряжения находятся в области больших запасов прочности. Однако в соответствии с гидродинамической теорией смазки даже без непосредственного контакта незначительный износ поверхностей все же наблюдается. В основном это является результатом физико-химических, в том числе электростатических процессов, возникающих между трущимися поверхностями и их контакта со смазочным материалом.

Коэффициент трения при жидкостном контакте поверхностей выражается отношением

$$f = \frac{k \cdot \eta \cdot v}{P}, \quad (4.7)$$

где k — коэффициент пропорциональности; η — динамическая вязкость смазочного материала; v — скорость скольжения; P — нормальная нагрузка (давление на поверхность трения).

Жидкостное трение — наиболее желательный вид трения с точки зрения предотвращения износа, потерь энергии, долговечности деталей. Оно наблюдается в подшипниках коленчатого вала двигателя в период установившегося режима работы (рис. 4.4).

В соответствии с гидродинамической теорией смазки при пуске двигателя адсорбированная на поверхностях коренных шеек вала масляная пленка увлекает за собой слои масла, которые в форме клина проникают между трущимися поверхностями (рис. 4.4, а). В том месте, где величина зазора между шейкой вала и подшипником скольжения минимальна $S_{\min}$, создается давление, уравниваю-

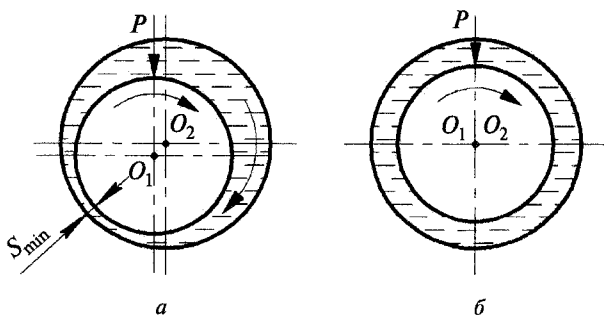


Рис. 4.4. Схема формирования масляного клина в подшипнике скольжения коленчатого вала:

O_1 — центр шейки коленчатого вала; O_2 — центр подшипника

щее внешнюю нагрузку P . При определенной частоте вращения вал как бы всплывает, не соприкасаясь непосредственно с подшипником, и стремится занять в нем центральное положение (рис. 4.4, б).

Для обеспечения надежного жидкостного трения минимальная толщина масляного слоя между трущимися поверхностями должна быть не менее

$$S_{\min} \geq 1,5 (h_1 + h_2), \quad (4.8)$$

где $S_{\min}$ — толщина масляного слоя; h_1 и h_2 — высоты выступов неровностей поверхностей сопряженных деталей.

Минимальная толщина масляного слоя, при котором создаются условия для жидкостного трения, зависит от конструктивных особенностей сопряжения, давления на поверхность трения, частоты вращения вала и абсолютной вязкости смазочного материала.

При **граничном трении** поверхности сопряженных деталей разделены слоями смазочного материала очень малой толщины (до 0,1 мкм). Практически в местах контакта трущиеся детали разделены лишь слоями молекул смазки, которые адсорбированы на поверхностях трения. Наличие граничного слоя или граничной пленки существенно снижает силы трения по сравнению с трением без смазочного материала и, соответственно, интенсивность изнашивания сопряженных поверхностей. Это связано с тем, что граничный слой смазки способствует более равномерному распределению контактных напряжений, их деконцентрации, уменьшению температурных всплесков и др.

Тем не менее, интенсивность изнашивания деталей в условиях граничного трения остается значительной. Из-за имеющихся микронеровностей их взаимодействие происходит на очень малых участках трения, на которые оказываются большие контактные давления, превышающие сопротивляемость материалу пластическому деформированию.

Механизм изнашивания при граничном трении заключается в следующем. При работе сопряжений под нагрузкой на участках контакта (в местах сближения микронеровностей) возникают напряженные зоны, упругие и пластические деформации, создаются условия для усталостного разрушения микронеровностей поверхностей. Кроме того, на участках с более высокими значениями давлений и температурных всплесков может произойти разрушение смазочной пленки с возникновением молекулярного взаимодействия обнажившихся микронеровностей поверхностей и даже их схватывание.

Высокая подвижность молекул смазочного материала способствует их адсорбции в местах разрушения граничной пленки с большой скоростью, что объясняет их свойство быстрого «самозалечивания» и предупреждения лавинообразного процесса схватывания.

В целом, в условиях граничного трения по сравнению с сухим существенно снижается интенсивность изнашивания и коэффициент трения. В табл. 4.1 приведены значения коэффициента трения для некоторых пар трения в зависимости от наличия слоя смазки.

Таблица 4.1. Значение коэффициента трения при различных условиях смазки

Материал пары трения	Условия смазки		
	сухое	граничное	жидкостное
Сталь по стали	0,2—0,5	0,08—0,1	0,05—0,04
Сталь по чугуну	0,1—0,2	0,07—0,09	0,02—0,04
Сталь по бронзе	0,1	0,07—0,1	0,02—0,04
Пластмасса по стали	0,6—0,8		0,09—0,1

На практике при работе механизмов и узлов машин наблюдаются смешанные или промежуточные виды трения (полужидкостное, полусухое и т. д.). Полужидкостная смазка, например, характерна для большинства зубчатых передач и подшипников качения.

Нормальная нагрузка при полужидкостном трении уравновешивается нормальной составляющей сил взаимодействия поверхностей по площадкам их контакта и силами гидродинамического давления в смазочном слое. Непременным условием создания гидравлического давления в слое смазки является возникновение сужающегося клиновидного зазора, в котором масло при трении образует подъемную силу (рис. 4.5).

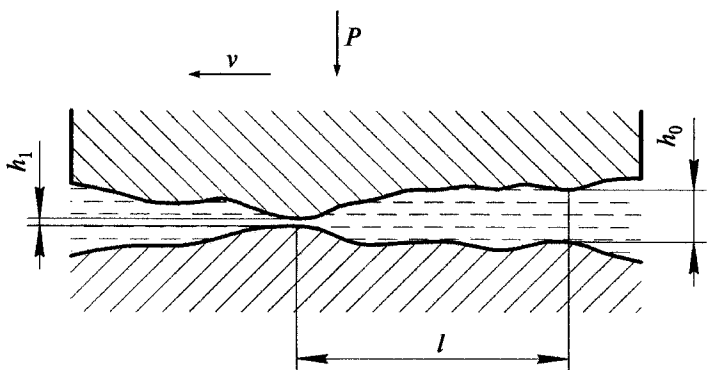


Рис. 4.5. Схема элементарного гидродинамического клина, возникающего в зоне трения:

P — нормальная сила; h_0 и h_1 — зазоры в основании и вершине клина; l — длина масляного клина

Для полного восприятия внешней нагрузки P возникающая при полужидкостном трении подъемная сила недостаточна. Однако из-за уменьшения механического и молекулярного взаимодействия выступов неровностей трущихся поверхностей наблюдается существенное снижение интенсивности их изнашивания.

Вид трения рабочих поверхностей зависит не только от толщины смазочного слоя, но и от режима работы сопряжения, количественной характеристикой которого служит параметр $\eta v/P$. В этом соотношении η — динамическая вязкость смазочного материала, v — скорость скольжения, P — нормальная нагрузка.

Наглядное представление об условиях перехода одного режима трения к другому дает диаграмма Герси—Штрибека (рис. 4.6).

На диаграмме линия $A-A$, проходящая через точку минимума коэффициента трения $f_{\min}$, отделяет область жидкостного трения 3 от двух других видов. При близких к нулю режимах работы сопряжения

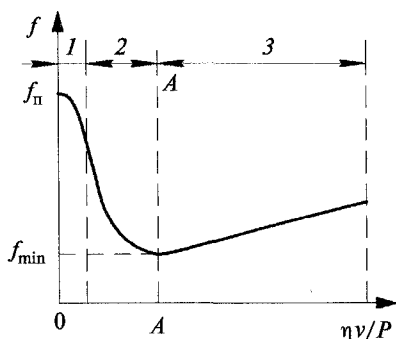


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента трения от режима работы сопряжения

коэффициент трения имеет максимальное значение ($f = 1$), что соответствует трению покоя, когда скорость скольжения $v = 0$.

При небольшом увеличении нагрузки P и скорости v (область 1) на поверхности трения адсорбируется очень тонкий слой смазочного материала, характерный для граничного трения. Коэффициент трения для таких условий работы поверхностей в зависимости от материалов пар составляет $f = 0,07—0,1$ (см. табл. 4.1).

С дальнейшим ростом нагрузочного и скоростного режимов работы сопряжения (параметра $\eta v/P$) толщина смазочного слоя увеличивается, снижаются механические и молекулярные воздействия на поверхность трения, и создаются условия для полужидкостного трения (область 2).

Если режим работы сопряжения переходит в зону 3, то поверхности трения полностью разделены слоем смазочного материала, который закрывает высоту их неровностей, и наступает жидкостной режим трения.

Жидкостная смазка обеспечивает установившийся режим работы сопряжения, при котором коэффициент трения стабилен и имеет минимальное значение ($f = 0,02—0,04$). Если возникает его кратковременное увеличение из-за роста, например скорости, повышается температура масла, снижается его вязкость, и, как следствие, уменьшается значение параметра работы сопряжения $\eta v/P$. В свою очередь, уменьшение значения этого параметра приводит к снижению коэффициента трения f и восстановлению режима работы сопряжения.

Таким образом, происходит своеобразное саморегулирование режима жидкостного трения за счет изменения температуры и вязкости масла.

4.4. Влияние на изнашивание смазочных материалов

Интенсивность изнашивания деталей машин во многом зависит от качества используемых смазочных материалов. От современных масел, применяемых в автомобилях, дорожно-строительных и других машинах требуется, во-первых, создание прочной поверхностной оксидной пленки, обладающей повышенной износостойкостью, и, во-вторых, устранение механического взаимодействия трущихся поверхностей деталей. Смазочные материалы позволяют минимизировать энергетические потери при эксплуатации машин, обеспечить надежность и долговечность их работы.

В соответствии с ГОСТ 27674—88 основное назначение смазочного материала — уменьшение износа трущихся поверхностей деталей и затрат энергии на преодоление трения. Смазочные материалы, как и металлы, из которых изготовлена машина, относятся к конструкционным материалам, в связи с чем к ним применимы все понятия и определения теории надежности. Они должны сохранять свои эксплуатационные свойства во времени или наработке в заданных условиях эксплуатации, поэтому от их правильного выбора и качества во многом зависит срок службы или ресурс любой машины.

Смазочные масла выполняют следующие функции:

- снижают трение, возникающее между сопряженными поверхностями деталей;
- предотвращают атомно-молекулярное взаимодействие материалов поверхностных слоев;
- защищают детали от коррозионного воздействия внешней среды;
- отводят тепло из зоны контакта;
- обеспечивают вынос продуктов изнашивания и коррозионного разрушения из зоны трения для последующей их фильтрации.

Практически любое смазочное масло представляет собой масляную основу (базовое масло), в которую для придания заданных физико-химических свойств вводят высокоэффективные присадки разного функционального назначения. По своему происхождению смазочные масла подразделяются на минеральные, органические и синтетические.

В качестве сырья для получения минеральных масел служат в основном нефть, а также каменный уголь и сланцы. Органические масла являются продуктами животного или растительного происхожде-

ния. Синтетические смазочные материалы получают путем синтеза различных органических или элементоорганических соединений на основе спиртов, эфиров и др. В конструктивных элементах сопряжений узлов и механизмов транспортных машин, в том числе и автомобилей, в настоящее время используются в основном минеральные и синтетические масла.

По назначению смазочные масла, используемые в машинах, подразделяются на моторные, трансмиссионные и гидравлические.

Отдельный класс смазочных материалов занимают пластические (консистентные) смазки.

Моторные масла

Моторные масла служат для смазки трущихся поверхностей поршневых двигателей внутреннего сгорания автомобилей и других транспортных машин.

Моторным маслам приходится работать в очень сложных условиях, так как детали двигателей внутреннего сгорания (ДВС) при работе подвергаются высоким механическим, тепловым и другим нагрузкам.

Поэтому для обеспечения высокой эксплуатационной надежности двигателей к современным моторным маслам предъявляется целый комплекс требований, основными из которых являются:

- высокая термическая и термоокислительная стабильность, позволяющая сохранять эксплуатационные свойства масла при высокой рабочей температуре;
- высокие моюще-диспергирующие свойства, обеспечивающие чистоту поверхностей деталей двигателей;
- стойкость к старению;
- вязкостно-температурная характеристика масла должна обеспечивать его хорошую прокачиваемость при холодном пуске двигателя и надежное смазывание при высоких нагрузках и температурах окружающей среды;
- высокие противоизносные и противозадирные свойства;
- отсутствие коррозионного воздействия на детали двигателя как при работе, так и в условиях длительного хранения;
- совместимость с конструкционными и другими материалами двигателя;
- стойкость к вспениванию при различных режимах работы двигателя.

Поэтому современные моторные масла при надежном выполнении ими заданных функций должны обладать необходимым уровнем эксплуатационных свойств. К важнейшим из них относятся:

- вязкостно-температурные;
- смазывающие;
- противокоррозионные;
- антиокислительные;
- моюще-диспергирующие;
- противопенные.

Вязкостно-температурные свойства смазочного материала характеризуют его вязкость в заданных условиях работы в зависимости от температуры и давления на поверхность трения.

Вязкость является основным свойством смазочного материала и представляет собой его способность оказывать сопротивление относительному перемещению слоев.

Это свойство характеризует внутреннее трение слоев смазки, сила которого определяется по формуле:

$$F = \eta \cdot S \cdot dv/dx, \quad (4.9)$$

где η — динамическая вязкость смазочного материала; S — площадь слоя смазки (поверхности трения); dv/dx — градиент скорости сдвига слоев смазки в направлении, перпендикулярном движению.

Для оценки вязкостно—температурных свойств моторных масел определяются их вязкостно-температурные характеристики (ВТХ) в диапазоне температур от 0 до 100 °С. Показателями этих свойств являются: динамическая вязкость (ГОСТ 1929—87), кинематическая вязкость (ГОСТ 33—2000) и индекс вязкости (ГОСТ 25371—97).

Динамическая вязкость η измеряется в паскаль секундах (Па · с).

Кинематическая вязкость ν определяется отношением динамической вязкости η к плотности смазочного материала

$$\nu = \eta / \rho, \quad (4.10)$$

где ρ — плотность смазочного материала, определяемая отношением массы смазочного материала m к его объему V :

$$\rho = m / V. \quad (4.11)$$

Вязкость масла изменяется с изменением температуры. С понижением температуры она существенно возрастает, что отражается на

прокачиваемости масла и эксплуатационных характеристиках работы машин (затрудняется пуск двигателя, увеличиваются потери мощности на трение сопряженных поверхностей, разделенных слоем масла и др.).

Прокачиваемость масла определяется его расходом при прохождении через узел трения. При снижении прокачиваемости возможны возникновение «масляного голодания» и преобразование жидкостного трения в граничное, полусухое или даже сухое. Поэтому чем ниже температура масла и, соответственно выше вязкость, тем выше интенсивность изнашивания деталей двигателя.

Масляное голодание в той или иной степени возникает при холодном пуске двигателя, что и вызывает повышенный износ его деталей. При определенной температуре масло вообще может потерять подвижность. Такая температура носит название температуры застывания масла (масло из жидкотекучего переходит в пластическое состояние). Поэтому при выборе масла стремятся к тому, чтобы изменение вязкости в заданном диапазоне температур было незначительным.

Для оценки вязкостных свойств смазочных масел при изменении температуры используется так называемый *индекс вязкости* (ИВ). Он позволяет оценить вязкостно-температурные свойства конкретного сорта смазки по сравнению с эталонными маслами. Чем выше значение ИВ, тем меньше изменяется вязкость масла при изменении температуры, тем выше его вязкостные свойства. Для двигателей внутреннего сгорания автомобилей в зависимости от степени их форсирования используют масла с индексом вязкости $ИВ = 120—150$.

Для сглаживания вязкостно-температурных характеристик и повышения ИВ масел в них вводятся различные загущающие (КП-5, КП-10, КП-20, В-1, В-2, Максойл В, ПМА «В», ПМА «Д» и др.) и депрессорные (Депрессал, ПМА М-7, ПМА СИ-1, АФК) присадки. Загущающие присадки придают более высокие вязкостные свойства маслам в зоне повышенных температур работы сопряжений, депрессорные, наоборот, снижают вязкость в зонах низких температур. Такие масла используют для смазывания узлов и механизмов, работающих в условиях больших перепадов температур.

Смазочные свойства масел объединяют совокупность антифрикционных, противоизносных и противозадирных свойств моторных масел, влияющих на процессы трения и изнашивания контактирующих поверхностей в узлах и механизмах двигателя. Для придания ба-

ювым маслам этих свойств в их состав вводят соответствующие присадки.

Антифрикционные свойства масел характеризуют их способность снижать потери на трение сопряженных деталей. Эти свойства обеспечиваются использованием синтетических масел или добавлением в базовые масла присадок типа АДТФ; MOLYVAN-807; VP-357; ПДФ-4; VANLUBE-871; ОЛОА-9750; Детерсол Д-50,-140,-180,-300.

Противоизносные свойства масла характеризуют их способность снижать интенсивность изнашивания деталей при умеренных нагрузках за счет повышения пластичности поверхностных слоев металла. Это свойство масел обеспечивается введением в них присадок ЭФО, ДФ-100, ДФБ, ВНИИНП-360, ЛАНИ-317, МАСМА-1603, Моликот, MOLYVAN-855.

Для улучшения **противозадирных свойств масел**, препятствующих возникновению молекулярно-механического изнашивания трущихся поверхностей и образованию на них задиров, используются такие присадки, как ЛЗ-309/2, ЛЗ-6/9, ЛЗ-23К, ЛЗ-318, ОТП, КИНХ-2, ГОС и др.

Противокоррозионными свойствами масел называют их способность не вызывать коррозию на деталях узлов и механизмов, выполненных из металлов. Эти свойства масел зависят от химического состава базовых масел, концентрации антиокислительных и антикоррозионных присадок, степени очистки масляной основы.

Коррозионная агрессивность масла возрастает в процессе эксплуатации из-за накопления в нем продуктов его окисления, образования минеральных и органических веществ. Снижение коррозионной агрессивности смазок достигается за счет добавок к маслу противокоррозионных присадок, образующих на поверхностях трения защитной пленки, или нейтрализации продуктов окисления. Коррозионная стойкость моторных масел обеспечивается за счет таких присадок, как АКОР-1, КП, В-15/41, Лубризол-1370, ОЛАО-267, Бетол-1, Купринол, NA-SUL и др. Эти присадки замедляют процесс окисления и образуют на поверхности металла защитные пленки, препятствующие разрушению металлов органическими кислотами.

Основным условием предотвращения коррозионного разрушения деталей двигателя является полное отсутствие в моторных маслах воды. В свежих маслах ее наличие не допускается стандартами, но она может попадать в них при транспортировке, хранении, заправке.

Антиокислительные свойства масла характеризуют его устойчивость к воздействию окислителей. В процессе эксплуатации машин смазочные масла под действием высоких температур, каталитического воздействия металла поверхности и других факторов подвергаются различного рода окислительным процессам. Наиболее интенсивно окисление масла происходит на поверхностях деталей ДВС, подвергающихся воздействию раскаленных газов (поршни, гильзы цилиндров, поршневые кольца, клапана).

Интенсивность процесса окисления возрастает при попадании в масло продуктов неполного сгорания топлива, а также частиц металла и неорганических загрязнений, накапливающихся в масле в результате изнашивания и коррозионного разрушения деталей.

Окисление масла является нежелательным процессом, так как существенно ухудшает его эксплуатационные свойства и приводит к преждевременному старению. При окислении моторного масла ухудшается его вязкостно-температурная характеристика, образуются различные продукты окислительных реакций в виде осадков (шламов), лаков, нагаров, интенсифицирующих процессы изнашивания деталей, их механизмов и узлов.

Осадки или шламы — низкотемпературные мазеобразные отложения из нерастворимых твердых и смолистых веществ, представляющие собой продукты окисления углеводородов продуктами загрязнения моторного масла. В шламе содержатся тяжелые фракции топлива, органические кислоты, смолисто-асфальтеновые вещества, зола, сажа, углеродистые продукты (карбены, карбоиды) и др.

Шламы являются наиболее опасными отложениями, которые забивают масляные каналы и фильтры, нарушая подачу масла к узлам трения. В изношенных двигателях в условиях проникновения в картер большого количества отработавших газов, которые ускоряют окисление масла, процессы образования шлама интенсифицируются. Ускоренному образованию шлама способствуют пары воды в картере и низкотемпературные условия эксплуатации, характерные при работе двигателя на режимах прогрева, особенно в зимний период.

Лаки представляют собой продукты окисления, которые покрывают поверхности деталей двигателя в виде тонких прочных пленок клейкого прочного углеродистого вещества, образующегося при температуре 150...–200 °С. В состав лаковых отложений входят асфальтены и окисикислоты, карбены и карбоиды, нейтральные смолы.

Процесс образования лаковых пленок включает окисление тонких слоев смазочного материала на поверхностях нагретых до высоких температур деталей с последующим осаждением на них продуктов окисления масла и сгорания топлива. Наиболее вредное воздействие лаковые отложения оказывают на такие детали двигателя, как поршневые кольца и поршни, вызывая их перегрев из-за снижения теплопроводности.

Нагар — это твердые углеродистые отложения, образующиеся на частях цилиндропоршневой группы двигателя, работающих в условиях высоких температур (450—950 °С). Нагарообразование начинается с возникновения на поверхности детали лаковой пленки, на которой осаждаются и удерживаются продукты окисления углеводородов (асфальтены, смолы, карбены, карбоиды), неполного сгорания топлива (сажа) и различные механические примеси. Под воздействием высоких температур образовавшиеся пленки обугливаются, превращаясь в нагар.

Нагар оказывает существенное влияние на долговечность двигателя в связи с нарушением рабочего процесса и ухудшением теплопроводности деталей, в результате чего общая температура двигателя повышается. В частности, образование нагара в камере сгорания вызывает ненормальное возгорание рабочей смеси (кокильное зажигание, детонацию).

Для снижения склонности масел к окислению в них вводят антиокислительные присадки (деактиваторы металлов): ДФ-1, ДФ-11, ДФБя, ДФБ-100, ВНИИНП-715, А-22,-23,-24; ЦД-7; К-34; АДТФ; ГДФ-3; ВСП и др.

Моюще-диспергирующие свойства масел характеризуют способность масел обеспечивать необходимую чистоту деталей двигателей и препятствовать прилипанию загрязняющих примесей к их поверхностям. Моющие присадки нейтрализуют и растворяют продукты старения масел, а диспергирующие поддерживают эти продукты во взвешенном состоянии, препятствуя их осаждению на поверхности деталей и образованию отложений.

Базовые масла не обладают моюще-диспергирующими свойствами. Для улучшения этих свойств и предупреждения образования углеродистых отложений повышают антиокислительную способность моторных масел, в них вводят специальные моюще-диспергирующие присадки: Днепрол, ВНИИНП-7120, НСК «ЮКОС», АСБ, Комплексил-250, Лубризол-3715, Тиомол-С, АЛОА-373-С и др.

Противопенные свойства масел определяют их способность предотвращать образование пены или ускорять ее разрушение. Пенообразование возникает вследствие интенсивного перемешивания и разбрызгивания масла при работе двигателя, его циркуляции по маслопроводам, наличия в масле воды и продуктов окисления. В результате образования пены ухудшаются смазочные и защитные свойства масла, нарушается нормальный процесс смазывания трущихся поверхностей, интенсифицируется окисление масла.

Для уменьшения вспениваемости в масла вводят противопенные присадки, в качестве которых широко используются *поликсилосилканы*.

Трансмиссионные масла

Трансмиссионные масла применяются для смазки зубчатых передач, шарнирных и других трущихся соединений агрегатов трансмиссии. Конструктивные элементы механизмов и агрегатов трансмиссии, передающие крутящий момент от двигателя ведущим колесам и изменяющие его величину и направление, работают в условиях воздействия на них высоких удельных давлений

Требования, предъявляемые к эксплуатационным свойствам трансмиссионных масел, обусловлены степенью и характером нагружения сопряженных деталей. В *механических трансмиссиях* масла работают в условиях больших контактных нагрузок (1500—2000 МПа — в червячных и конических передачах, 3000—4000 МПа — в гипоидных), высоких скоростях скольжения и широком диапазоне температур. Поэтому трансмиссионные масла должны обладать более высокой вязкостью, чем моторные. Для обеспечения надежной работы элементов механической трансмиссии масла, кроме того, должны обладать повышенными смазочными, противоизносными и противозадирными свойствами.

Для улучшения эксплуатационных свойств в состав трансмиссионных масел вводятся противоизносные, противозадирные, антиокислительные, антикоррозионные и депрессионные присадки. Отечественными предприятиями выпускаются следующие всесезонные трансмиссионные масла: ТМ-2-18, ТМ-3-9, ТМЗ-18, ТМ-4-18, ТМ-5-18, ТМ-4-9.

Трансмиссионные масла для *гидромеханических передач* должны обладать вязкостно-температурными, противоизносными, фрикционными, антиокислительными, противопенными и антикоррозион-

ными свойствами, а также хорошей совместимостью с уплотнителями. Для гидромеханических передач отечественные масла выпускаются трех марок: МГТ, А (МГ-15-В) и Р (МГ-22-В).

Масла для *гидродинамических (автоматических) трансмиссий*, используемые в автоматических коробках передач, гидроусилителях рулевого управления, гидравлических системах машин, относятся к наиболее сложным многофункциональным смазочным материалам. К ним предъявляются повышенные вязкостно-температурные, антикоррозионные, противоизносные, антиокислительные, противопенные и фрикционные свойства. Для автоматических трансмиссий применяются всесезонные отечественные масла марки «А», или зарубежные трансмиссионные масла типа ATF Dexron VI, ATF Merson V, МГТ.

Гидравлические масла

Гидравлические масла используются в качестве рабочих жидкостей гидравлических систем машин различного назначения. Наряду с этим они выполняют роль смазочного материала конструктивных элементов этих систем, осуществляют теплоотвод из зоны трения и очистку деталей от загрязнений.

В зависимости от функционального назначения и условий работы гидравлические масла должны обладать хорошими вязкостно-температурными, смазочными, антиокислительными, антикоррозионными, противоизносными и низкотемпературными свойствами, низкой сжимаемостью и отсутствием разрушающего воздействия на материалы уплотнений в гидравлических системах.

Для придания гидравлическим маслам требуемых эксплуатационных свойств в них добавляют специальные присадки (вязкостные, антиокислительные, антикоррозионные и др.).

В соответствии с ГОСТ 17479.3—85 по эксплуатационным свойствам гидравлические масла подразделяются на группы: А — минеральные масла без присадок; Б — минеральные масла с антиокислительными и антикоррозионными свойствами; В — минеральные масла с антиокислительными, антикоррозионными и противоизносными свойствами.

Для автотракторных, дорожных, строительных и сельскохозяйственных машин используются отечественные гидравлические масла марок: МГ-15-Б и МГ-15-В (маловязкие гидравлические масла);

МГ-22-А и МГ-22-Б (гидравлические масла средней вязкости); МГ-46-В и МГ-68-В (высоковязкие гидравлические масла).

Пластические смазочные материалы

Пластические смазки широко используются для смазки подшипников качения и скольжения, шарнирных и шлицевых сопряжений, наконечников тяг рулевого управления, труднодоступных узлов трения машин, а также для герметизации и уплотнения различных сопряжений.

Пластическая смазка представляет собой смесь, состоящую из минерального масла, загустителя и присадок. Масло смазывает трущиеся поверхности, загуститель придает ему необходимую вязкость, присадки улучшают эксплуатационные свойства.

Учитывая специфические условия работы, пластические смазочные материалы должны обладать высокими вязкостно-температурными и смазочными свойствами для снижения интенсивности изнашивания, предотвращения задира и заедания трущихся поверхностей сопряженных деталей. Кроме того, к ним предъявляется требование высокой влагостойкости, т. е. они не должны растворяться в воде, смываться, поглощать влагу в процессе эксплуатации машин.

Для улучшения эксплуатационных свойств в пластические смазки добавляют соответствующие присадки: противоизносные, противозадирные, антифрикционные, вязкостные, антикоррозионные и др. Кроме присадок, в пластические смазочные материалы добавляют наполнители, обладающие низким коэффициентом трения (графит, тальк, порошки цинка, меди, алюминия, бронзы и прочие твердые добавки).

В соответствии со стандартом ASTM D 4950 пластические смазки для автотранспортной техники подразделяются на две основные группы:

L — для смазывания узлов ходовой части;

G — для смазывания подшипников колес.

Из большого ассортимента пластических смазок, выпускаемых отечественными предприятиями, для автотракторной и дорожно-строительной техники наиболее широкое распространение получили следующие сорта масел: Литол-24, ЛСЦ, Консталин УТ-1, Фиол-2У, ШРБ-4, ШРУС-4, АМ-карданная, ЦИАТИМ-221, ДТ-1, № 158, Лита.

4.5. Зависимость интенсивности изнашивания от механических характеристик и структуры материалов деталей

Изнашивание, также как и трение, является комплексным процессом. При относительном перемещении двух поверхностей в области их контакта возникают механические и молекулярные связи, сопровождающиеся тепловыми, окислительными и другими эффектами. Разрыв этих связей вызывает разрушение микровыступов поверхностного слоя и приводит к их удалению, т. е. к изнашиванию. Поэтому все прочностные характеристики материалов (предел прочности, предел упругости и т. д.) играют определенную роль в каждом элементарном акте разрушения.

В наибольшей степени из всех механических характеристик на износостойкость металлов (их способность сопротивляться разрушению поверхности детали при трении) оказывает влияние их твердость.

Твердостью называется свойство материала сопротивляться пластической деформации при вдавливании в его поверхность твердого тела (индентора). При измерении твердости в качестве индентора используют стальной закаленный шарик, алмазный конус или четырехгранную алмазную пирамиду.

Для чистых металлов и термически не обработанных сталей зависимость между твердостью и относительной износостойкостью определяется выражением:

$$\varepsilon = bH, \quad (4.12)$$

где ε — относительная износостойкость, т. е. отношение износа эталонного материала к износу испытуемого; b — коэффициент пропорциональности; H — твердость по Виккерсу.

Для термически обработанных деталей износостойкость также возрастает с увеличением твердости, но в меньшей степени, и выражается соотношением:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b'(H - H_0), \quad (4.13)$$

где ε_0 — относительная износостойкость стали в отожженном состоянии; b' — коэффициент пропорциональности, имеющий разную величину для сталей разного химического состава; H — твердость тер-

мически обработанной стали; H_0 — твердость стали в отожженном состоянии.

Механические свойства поверхностного слоя формируются в основном при обработке деталей и характеризуются глубиной и степенью упрочнения, а также величиной и характером распределения остаточных напряжений.

При механической обработке заготовок деталей основное влияние оказывают силовые воздействия. В результате материал детали пластически деформируется, изменяется его структура и увеличивается плотность дислокаций. Образование дислокаций и измельчение зерен сопровождаются повышением твердости поверхностного слоя, его упрочнением, которое характеризуется степенью и глубиной наклепа.

Степень наклепа определяется из выражения

$$\delta H = (H_{\text{обр}} - H_{\text{исх}})/H, \quad (4.14)$$

где $H_{\text{исх}}$, $H_{\text{обр}}$ — твердость поверхности детали до и после обработки.

При механической обработке в поверхностных слоях материала детали возникают остаточные напряжения, обусловленные тем, что недеформированные нижние слои материала препятствуют распространению деформаций верхних слоев. В результате в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, а в нижних слоях — растягивающие.

На возникновение остаточных напряжений оказывает влияние и неравномерность нагрева слоев металла. При обработке поверхностный слой детали нагревается, и увеличивается его объем. Нижележащие холодные слои препятствуют этому, в результате чего в поверхностном слое возникают напряжения растяжения, а в нижних слоях — напряжения сжатия.

Структурно-фазовые превращения, возникающие при воздействии силовых и тепловых факторов в процессе обработки детали, предопределяют, в конечном счете, распределение остаточных напряжений в поверхностном слое (сжимающих $-\sigma$ или растягивающих $+\sigma$).

Существенное влияние на износостойкость оказывают структура и химический состав материалов. При изготовлении деталей машин чистые металлы имеют весьма ограниченное применение. В основном конструкционными материалами являются сплавы, которые получают сплавлением и спеканием двух или более металлов или метал-

на с металлом (например, сталь, представляющая собой сплав железа с углеродом).

Положительное влияние на повышение износостойкости для сплавов оказывают мелкозернистая структура, наличие твердых структурных составляющих, полезных примесей. Чем мельче зерно стали, тем выше ее конструкционная прочность, предел выносливости и износостойкость. Чем крупнее зерно, тем более сталь склонна к закалочным трещинам и деформациям.

На механические свойства стали большое влияние оказывает количество углерода. С увеличением содержания углерода в стали повышается ее твердость HB , пределы прочности σ_B и текучести σ_T , но снижается ударная вязкость kC (рис. 4.7).

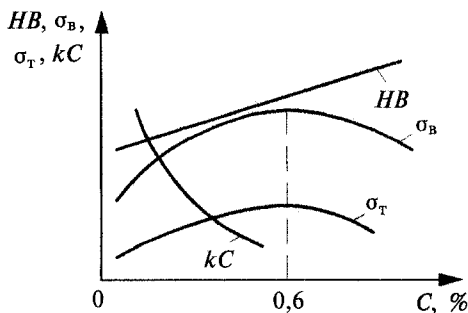


Рис. 4.7. Зависимость механических свойств сталей от содержания углерода

Таким образом, при насыщении стали углеродом, который представляет собой твердые хрупкие частицы, повышаются ее прочностные характеристики и снижаются показатели пластичности. При этом, как видно из приведенных зависимостей, пределы прочности и выносливости увеличиваются до содержания углерода в стали, равном 0,55—0,65 %, при большем содержании — снижаются.

Помимо железа и углерода в сталях всегда содержатся технологические примеси, которые подразделяются на полезные и вредные. К полезным примесям относятся кремний и марганец, повышающие прочностные характеристики стали.

Вредными примесями считаются сера и фосфор, а также газы: азот, кислород и водород. Азот и кислород присутствуют в стали в виде неметаллических включений (оксидов, нитридов) или в свободном виде, располагаясь в дефектных участках металла (раковинах,

трещинах). Такие включения являются концентратами напряжений и снижают прочностные характеристики сплавов.

При оценке степени влияния структуры стали на ее износостойкость следует отметить, что в процессе трения в поверхностном слое образуются новые фазы и структуры, в основном окисные и другие пленки, предохраняющие поверхность металла от непосредственного контакта. Износостойкость при таком изнашивании определяется скоростью образования этих вторичных структур и их свойствами.

4.6. Влияние на изнашивание качества поверхности детали

Разрушение деталей, и прежде всего изнашивание, в большинстве случаев начинается с поверхности, так как поверхностные слои наиболее нагружены и подвержены воздействию внешней среды. Поэтому качество поверхностного слоя оказывает большое влияние на износостойкость детали.

Качество поверхности детали характеризуется физическими и геометрическими параметрами. Физические параметры поверхности (структура и твердость поверхностного слоя, остаточные напряжения в нем, глубина наклепа) были рассмотрены выше. К важнейшим геометрическим параметрам качества поверхности относятся: макрогеометрия, шероховатость, волнистость и направление следов обработки.

Макрогеометрия характеризует различные отклонения формы реальной поверхности детали от номинальной, т. е. формы, заданной чертежом. К ним прежде всего относятся отклонения от прямолинейности, плоскостности, круглости, профиля продольного сечения и цилиндричности.

Для цилиндрических поверхностей характерны отклонения от круглости (овальность и огранка) и отклонения от профиля продольного сечения (конусообразность, бочкообразность и седлообразность) (рис. 4.8).

От макрогеометрии зависит правильность относительного расположения и перемещения сопряженных поверхностей деталей, а также прочность неподвижных посадок. Значение макрогеометрии особенно существенно для таких деталей машин, как цилиндры двигателя,

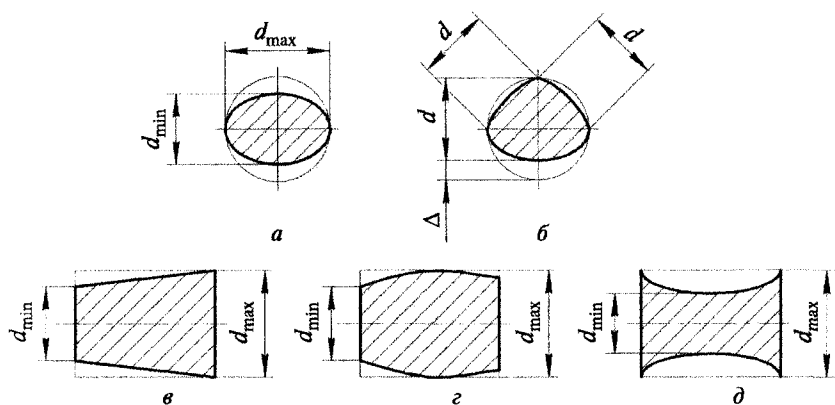


Рис. 4.8. Отклонение формы цилиндрических поверхностей:

a — овальность; *б* — огранка; *в* — конусообразность; *г* — бочкообразность; *д* — седлообразность

шейки коленчатых валов, тонкостенные вкладыши, прецизионные элементы топливных насосов высокого давления и др.

Шероховатостью поверхности согласно ГОСТ 25142—82 называется совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами в пределах базовой длины L . Профилограмма поверхности трения приведена на рис. 4.9.

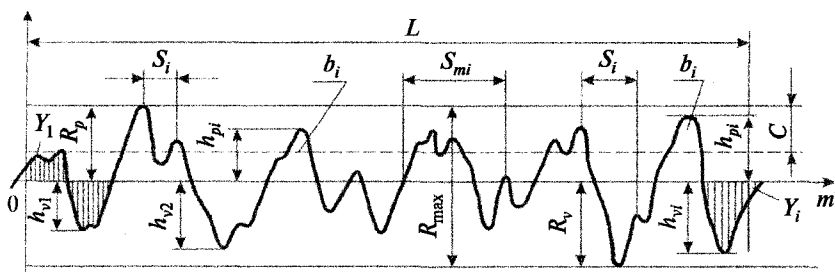


Рис. 4.9. Профилограмма поверхности для определения шероховатости

При оценке шероховатости поверхности используется понятие базовой длины, по величине которой шероховатость количественно отличается от других видов неровностей — волнистости и макронеровности. Числовые значения шероховатости поверхности определяют от единой базы, за которую принята средняя линия профиля линии.

Средняя линия профиля m — это базовая линия, имеющая форму минимального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально.

Шероховатость поверхности изделий независимо от материала и способа изготовления оценивается следующими параметрами:

- *среднее арифметическое отклонение профиля R_a* — среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (4.15)$$

где L — базовая длина; n — число выбранных точек профиля на базовой длине; y_i — расстояние между точкой профиля и средней линией m (отклонение профиля);

- *высота неровностей профиля по десяти точкам R_z* — сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших впадин профиля и глубин пяти наибольших выступов профиля в пределах базовой длины L

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |h_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |h_{vi}| \right], \quad (4.16)$$

где h_{pi} — высота i -го наибольшего выступа профиля; h_{vi} — глубина i -й наибольшей впадины профиля;

- *наибольшая высота неровностей профиля $R_{\max}$* — расстояние между линией выступов и линией впадин

$$R_{\max} = R_p + R_v, \quad (4.17)$$

где R_p , R_v — наибольшие значения выступов и впадин профиля в пределах базовой длины;

- *средний шаг неровностей профиля S_m* — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}, \quad (4.18)$$

где S_{mi} — шаг неровностей профиля, равный длине отрезка средней линии, заключенного между точками пересечения смежных выступов и впадин профиля со средней линией;

- *средний шаг неровностей профиля по вершинам S* — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (4.19)$$

где S_i — шаг неровностей профиля, равный длине отрезка средней линии, заключенного между проекциями на нее наибольших точек двух соседних местных выступов профиля.

На высоту микронеровностей рабочих поверхностей деталей влияют многие факторы:

- обрабатываемый материал (поверхности из малоуглеродистых сталей имеют большую высоту микронеровностей по сравнению с высокоуглеродистыми);
- способ и режим обработки (подачи, скорости и силы резания);
- материал режущего инструмента (обработка заготовок инструментом из твердого сплава обеспечивает менее шероховатую поверхность по сравнению с инструментом из быстрорежущей стали);
- жесткость технологической системы (вибрация элементов технологической системы, под воздействием которой изменяется положение режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой поверхности, приводит к образованию впадин и выступов).

Большое влияние на шероховатость поверхности оказывают заключительные операции обработки деталей (табл. 4.2).

Таблица 4.2. Значения шероховатости в зависимости от способа обработки детали

Способ обработки	Ra , мкм
Точение: чистовое тонкое	1,25—2,50 0,32—0,63
Фрезерование цилиндрической фрезой: чистовое тонкое	3,20—6,30 1,60
Развертывание: чистовое тонкое	0,63—1,25 0,32

Окончание табл. 4.2

Способ обработки	<i>Ra</i> , мкм
Растачивание: чистовое тонкое	1,60—3,20 0,40—0,80
Шлифование круглое: чистовое тонкое	0,80—1,60 0,20—0,40
Шлифование плоское: чистовое тонкое	0,32—0,63 0,08—0,20
Хонингование: чистовое тонкое	0,10—0,32 0,05—0,20
Обкатка роликами и шариками	0,40—1,60

Шероховатость рабочих поверхностей оказывает существенное влияние на все их эксплуатационные свойства, и прежде всего на износостойкость. Особенно большое влияние шероховатости на интенсивность изнашивания проявляется в сопряжениях с зазором на стадии приработки. В процессе приработки таких сопряжений шероховатость изменяется как по размерам, так и по форме (рис. 4.10).

Для каждой пары трущихся деталей на установившихся после приработки режимах их работы формируется своя оптимальная «эксплуатационная» шероховатость. Поэтому смысл этапа приработки и заключается в переходе микрогеометрии поверхностей трущихся пар от начальной технологической к установившейся эксплуатационной.

По окончании приработки, как видно из приведенных зависимостей, наступает период нормальной работы сопряжения, который характеризуется постоянством скорости изнашивания деталей.

Шероховатость поверхности оказывает существенное влияние и на коррозионную стойкость детали. Коррозия гораздо быстрее проникает и распространяется в рабочие поверхности с увеличением шероховатости. Процесс последующего разрушения поверхностных слоев, предварительно разрыхленных коррозией, протекает с большей интенсивностью.

В плотных и неподвижных соединениях (посадках с натягом) шероховатость также оказывает большое влияние на точность и проч-

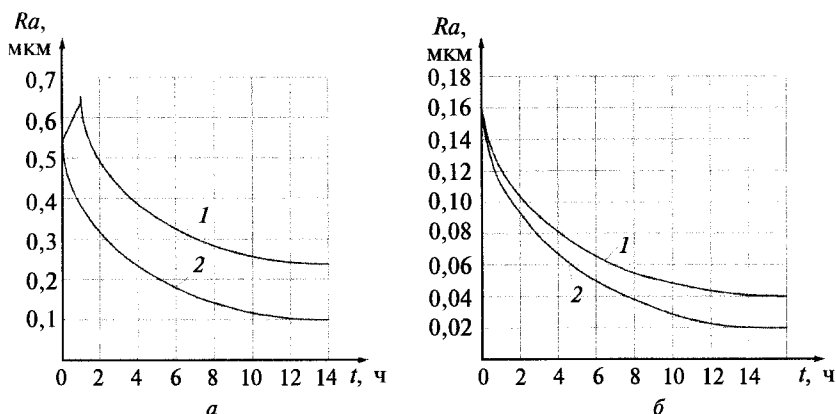


Рис. 4.10. Изменение шероховатости деталей цилиндропоршневой группы в процессе обкатки двигателя:

a — поршень; b — гильза цилиндров; 1 — на обкаточном масле; 2 — на масле с присадками; Ra — параметр шероховатости; t — время обкатки

ность сопряжений. Чем больше шероховатость поверхностей деталей таких соединений, тем меньше их прочность.

Волнистостью поверхности называют совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышениями или впадинами превышают базовую длину L . Волнистость занимает промежуточное положение между макрогеометрией и шероховатостью. Условно границу между этими отклонениями поверхности устанавливают по величине отношения шага неровности S_w к ее высоте h_w .

При отношении $S_w/h_w < 40$ отклонения относят к шероховатости поверхности; при $1000 \geq S_w/h_w \geq 40$ — к волнистости; при $S_w/h_w > 1000$ к отклонениям формы.

Для оценки волнистости поверхности служат следующие параметры (рис. 4.11):

- *высота волнистости* — среднее арифметическое пяти ее значений

$$h_{wi} = \frac{1}{5} (h_{w1} + h_{w2} + h_{w3} + h_{w4} + h_{w5}); \quad (4.20)$$

- *наибольшая высота волнистости* $h_{w \max}$ — расстояние между высшей и низшей точками измеренного профиля в пределах одной полной волны L_w ;

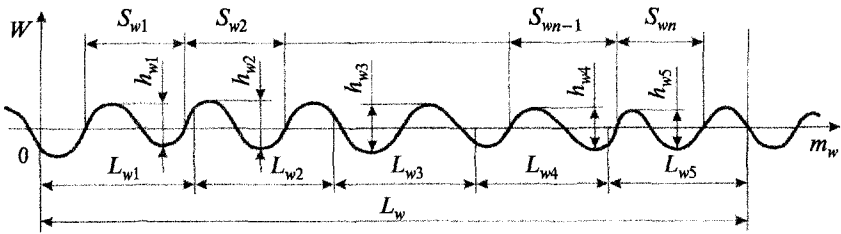


Рис. 4.11. Профилограмма поверхности для определения волнистости

- *средний шаг волнистости S_w* — среднее арифметическое шагов S_{wi} , измеренных по средней линии профиля m_w

$$S_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{wi} . \tag{4.21}$$

Шероховатость, волнистость, отклонение формы поверхности существенно влияют на показатели надежности машин и их агрегатов. Эти погрешности возникают как в процессе изготовления деталей,

Таблица 4.3. Виды направлений неровностей обработанных поверхностей

Направления неровностей	Схематическое изображение	Условное обозначение
Параллельное		
Перпендикулярное		
Перекрещивающееся		
Произвольное		
Кругообразное		
Радиальное		

так и в процессе эксплуатации машины под воздействием силовых и температурных деформаций и вибрации.

Направление неровностей поверхности определяется кинематикой движения инструмента и зависит от способа обработки детали (точение, сверление, фрезерование, шлифование и др.). В табл. 4.3 приведены направления неровностей поверхности и их условные обозначения.

4.7. Влияние на изнашивание условий эксплуатации

В общем случае на интенсивность изнашивания деталей транспортных машин оказывает влияние множество факторов их реальной эксплуатации: состояние дорог, условия хранения, природно-климатические условия, эксплуатационные режимы работы, качество используемых эксплуатационных материалов и др.

Дорожные условия характеризуются технической категорией дороги, видом и качеством дорожного покрытия, а также рельефом местности.

В соответствии со СНиП 2.05.02—95 по качеству дорожного покрытия автомобильные дороги в РФ подразделяются на пять групп:

Д₁ — цементобетон, асфальтобетон, мостовые из брусчатки и мозаики на бетонном основании;

Д₂ — битумоминеральные смеси (щебень или гравий, обработанные битумом);

Д₃ — щебень, гравий и песок, обработанные вяжущими добавками, дегтебетон;

Д₄ — булыжник, колотый камень, малопрочные каменные материалы, в том числе обработанные вяжущими добавками;

Д₅ — естественные грунтовые дороги.

Чем ниже качество дорожного покрытия, тем выше интенсивность изнашивания поверхностей деталей. При движении автомобиля в его трущиеся агрегаты и узлы проникает дорожная пыль, основным компонентом которой являются частицы кварца. Попадая на трущиеся детали, эти частицы вызывают их абразивное изнашивание. Особенно большой вред оказывают мелкодисперсные частицы пыли, которые практически не задерживаются фильтрующими элементами.

Запыленность воздуха при движении автомобиля по асфальтовому шоссе в среднем в летних условиях составляет примерно 15 мг/м^3 ,

а по грунтовым дорогам доходит до 6000 мг/м^3 . Определенное количество частиц дорожной пыли попадает и в топливные баки автомобилей. Особенно это характерно для автомобилей-самосвалов, а также при работе грузовых автомобилей на стройках, в карьерах и на грунтовых дорогах, когда концентрация загрязнения достигает $200\text{—}300 \text{ г}$ на одну тонну топлива.

Из множества факторов, характеризующих состояние дорог, больше остальных на потерю транспортными средствами их работоспособности влияет неровность дороги. Возникающие при движении по таким дорогам колебания масс отдельных частей, оборудования транспортных средств оказывают влияние практически на все свойства их надежности, включая безотказность и долговечность. При этом эксплуатация транспортных машин по дорогам с большими неровностями существенно интенсифицирует их эксплуатационные повреждения, включая и процессы изнашивания. Это касается, прежде всего, таких узлов и агрегатов автотранспортных средств, как подвеска, мосты, карданная передача, рулевое управление и др.

Существенное влияние на интенсивность изменения технического состояния автомобиля оказывают *температура окружающего воздуха, его влажность, интенсивность атмосферных осадков, агрессивность окружающей среды, сезонные колебания условий эксплуатации* и др. По данным ряда исследований, минимальное значение количества отказов элементов автомобиля происходит при температуре окружающего воздуха от -5 до $+15^\circ\text{C}$ (рис. 4.12).

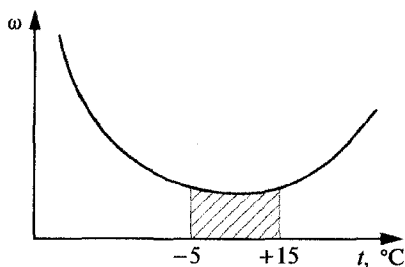


Рис. 4.12. Зависимость количества отказов автомобиля от температуры окружающего воздуха $t, ^\circ\text{C}$

Агрессивность окружающей среды связана с коррозионной активностью воздуха, что характерно при эксплуатации автомобилей в прибрежных морских районах или при их использовании для посто-

инной перевозки химических грузов. Такие условия эксплуатации вызывают интенсивную коррозию деталей, сокращая нормативный ресурс автомобиля.

Интенсивность изменения технического состояния автомобиля зависит и от сезонных условий эксплуатации, вызываемых колебаниями температуры воздуха, дорожными условиями по временам года. В осенне-зимний период, например, при выпадении осадков в виде дождя и снега условия движения автомобиля ухудшаются.

При изменении условий эксплуатации происходит изменение не только интенсивности, но и вида изнашивания деталей и сопряжений. Абразивное изнашивание деталей кривошипно-шатунного механизма двигателя, например, в большей степени проявляется в летних условиях эксплуатации, а коррозионно-механическое — в зимних. Поэтому летом необходимо принимать меры по предотвращению попадания в двигатель пыли, а зимой — следить за его тепловым состоянием, не допуская переохлаждения.

Существенное влияние на интенсивность изнашивания деталей машин оказывают *эксплуатационные режимы их работы*. При движении автомобиля режимы его работы постоянно меняются, т. е. имеют место так называемые *нестационарные (неустановившиеся) режимы*. В целом, эксплуатационные режимы работы автомобиля определяются комплексом скоростных, нагрузочных и тепловых режимов, обусловленных климатическими условиями, рельефом местности, качеством дорожных покрытий, квалификацией водителя и другими факторами.

По результатам статистических исследований, нестационарные режимы работы при эксплуатации автомобилей составляют:

- 90—95 % — в условиях городского интенсивного движения;
- 85—90 % — при движении по грунтовым дорогам;
- 30—35 % — на загородных автомагистралях.

Работа автомобилей на неустановившихся режимах приводит к увеличению интенсивности изнашивания деталей и сопряжений, существенному снижению их ресурса. На таких режимах работы двигателя интенсивность изнашивания поршней увеличивается в 1,2—1,8 раза, поршневых колец в 2,5—3,5 раза, подшипников коленчатого вала в 1,4—1,8 раза. В среднем износ конструктивных элементов двигателей при работе на неустановившихся режимах возрастает в 1,2—2 раза.

В этой связи при эксплуатации автомобиля большое значение имеет разработка рациональных методов вождения. Следует исклю-

чить при движении способ «разгон—накат», так как он приводит к увеличению изнашивания деталей двигателя и агрегатов трансмиссии. Это объясняется тем, что ухудшается качество смазки механических систем двигателя, возникают дополнительные циклические нагрузки в агрегатах трансмиссии (сцеплении, карданном валу, ведущем мосту).

Разновидностью неустановившегося режима работы автомобиля является режим принудительного холостого хода и торможения двигателем. В условиях городского движения эти режимы составляют от 5 до 20 % общего времени движения автомобиля [19]. Такой режим нередко используется при движении под уклон с включенной передачей. Подача топлива в цилиндры при этом соответствует режиму холостого хода при минимальных оборотах, а частота вращения коленчатого вала, обусловленная скоростью вращения колес автомобиля, увеличивается. В результате топливовоздушная смесь в цилиндрах обедняется, сгорание происходит с перебоями, и несгоревшее топливо частично выбрасывается в выпускную систему, а частично конденсируется, разжижая смазку и способствуя интенсификации изнашивания. Поэтому при вождении продолжительность работы двигателя на режиме принудительного холостого хода желательно по возможности сокращать.

Решающее влияние на показатели надежности двигателя оказывают нагрузочный и скоростной режимы его работы. Нагрузка при этом характеризуется величиной среднего эффективного давления в цилиндрах P_e , а скоростной режим — частотой вращения коленчатого вала двигателя n . Экспериментальные зависимости величины износа I ряда деталей цилиндропоршневой группы двигателя ЗМЗ показаны на рис. 4.13 [11].

Из приведенных на рис. 4.13, а зависимостей видно, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала возрастают износы деталей двигателя. Это связано с ростом инерционных сил, механических нагрузок на детали кривошипно-шатунного механизма, изменением теплового режима двигателя.

В связи с этим эксплуатация двигателей на повышенных оборотах крайне нежелательна. Некоторый рост износов деталей при малых оборотах коленчатого вала n связан со снижением давления в системе смазки двигателей и, как следствие, с ухудшением гидродинамического режима их работы.

Существенное влияние на интенсивность изнашивания деталей двигателя оказывает и нагрузочный режим (среднее эффективное

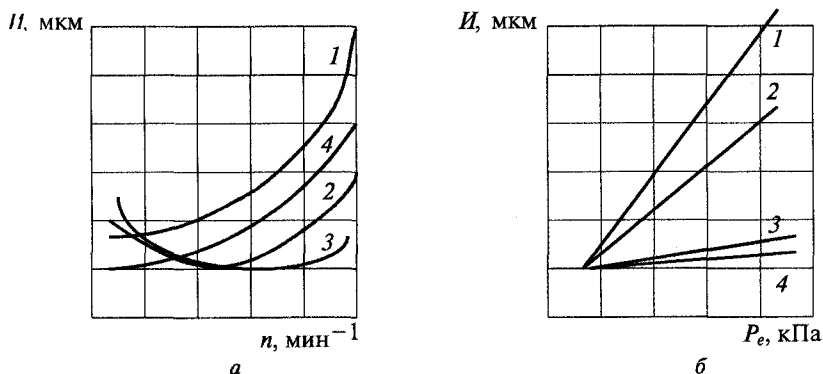


Рис. 4.13. Влияние частоты вращения коленчатого вала n и среднего эффективного давления P_e на износ деталей двигателей 3МЗ:

a — при $P_e = \text{const}$; b — при $n = \text{const}$; 1 — цилиндры; 2 — поршневые кольца; 3 — шейки коленчатого вала; 4 — стержни клапанов и направляющие втулки

давление в цилиндрах P_e). С ростом нагрузки, т. е. с увеличением подачи топливоздушной смеси, интенсивность изнашивания деталей возрастает практически прямо пропорционально величине P_e (см. рис. 4.13, б). Это связано с увеличением объема сгораемого топлива в цилиндрах, в результате чего возрастают механические нагрузки на детали кривошипно-шатунного механизма. Кроме того, интенсифицируется процесс изнашивания и вследствие роста температуры на поверхностях трения из-за повышения нагрузочных режимов двигателя.

Таким образом, повышенные скоростной и нагрузочный режимы приводят к увеличению интенсивности изнашивания деталей двигателя и снижению его ресурса. При этом, как следует из рис. 4.13, повышенный скоростной режим вызывает большее увеличение износов деталей двигателя, чем повышенный нагрузочный режим. Поэтому с точки зрения рационального использования ресурса двигателя предпочтительнее движение на повышенных передачах при пониженных оборотах коленчатого вала. Желательно также по возможности спокойное движение, без резких изменений режимов работы. Работа же автомобиля на коротких расстояниях с длительными остановками и частыми пусками двигателя приводит к увеличению интенсивности изнашивания деталей.

Необходимым условием нормального изнашивания деталей является обеспечение оптимальных тепловых режимов их работы. При

относительном перемещении контактирующих поверхностей в зоне трения закономерно изменяется температура, что влечет за собой изменение структуры поверхностного слоя, смазывающей способности масла, коэффициента трения и, как следствие, скорости изнашивания.

Для заданных условий эксплуатации необходимо устранить прежде всего нежелательные виды изнашивания (механическую форму абразивного износа, схватывание, тепловое и усталостное изнашивание), которые вызывают аварийное разрушение поверхностных слоев металла. К допустимым можно отнести только окислительную и механохимическую формы изнашивания с постепенным разрушением поверхности деталей.

Устранение абразивных процессов связано, главным образом, с очисткой среды в зоне трения от абразивных частиц, попадающих туда с воздухом через систему питания, топливом, маслом. Поэтому качественная очистка воздуха, топлива и масла — основной фактор снижения интенсивности изнашивания таких деталей двигателя, как, например, цилиндры, поршни, кольца, сопряжения в подшипниках коленчатого и распределительного валов. Для повышения долговечности деталей в процессе эксплуатации автомобилей необходимо следить за фильтрами очистки воздуха, топлива и масла, исключить попадание неочищенного воздуха в двигатель, абразивных частиц в топливо и масло при хранении и заправке.

Для устранения усталостного изнашивания необходимо, чтобы нагрузки при трении качения, действующие на контактирующие поверхности (подшипников качения, зубчатых передач, кулачковых механизмов и др.), не превышали предела текучести.

Вопросы для самопроверки

1. Как влияют на интенсивность изнашивания деталей давление на поверхность трения и скорость относительного перемещения?
2. Объясните зависимость интенсивности изнашивания от температуры поверхности трения.
3. Какое влияние на изнашивание оказывают разные виды трения?
4. При каких условиях возникает жидкостное трение?
5. Каким требованиям должны отвечать моторные масла?
6. Приведите наиболее важные эксплуатационные свойства моторных масел.

7. Какие продукты окисления моторных масел образуются при работе двигателя?
8. Назовите основные эксплуатационные свойства трансмиссионных масел.
9. Каким требованиям должны отвечать пластические смазочные материалы?
10. Какие механические характеристики материалов деталей в наибольшей степени оказывают влияние на процессы их изнашивания?
11. Что характеризует макрогеометрия поверхности конструктивных элементов?
12. Что понимается под шероховатостью поверхности детали и какими параметрами она оценивается?
13. Какими параметрами оценивается волнистость поверхности?
14. Охарактеризуйте влияние условий эксплуатации машин на процессы изнашивания?
15. Как влияют скоростные и нагрузочные режимы эксплуатации двигателя на интенсивность изнашивания его деталей?

Глава 5

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Для решения проблемы обеспечения высокого уровня надежности необходимы различные сведения об условиях работы конструктивных элементов машин, действующих на них нагрузках, характере и причинах возникновения отказов и неисправностей, а также показателях безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Наличие такой информации является необходимым условием управления надежностью машин на всех стадиях их жизненного цикла и основой для разработки мероприятий по совершенствованию конструкций, технологическим процессам их изготовления и технической эксплуатации.

Источниками информации о надежности автомобилей являются расчеты при их проектировании, различные виды стендовых и дорожных испытаний, статистические данные автотранспортных предприятий об отказах конструктивных элементов, характере и причинах их возникновения, наработках до предельного состояния и других показателях эксплуатационной надежности.

На начальной стадии создания автомобиля (проектирование) основным источником сведений об уровне ожидаемой надежности являются результаты конструкторских расчетов и статистические данные об его аналогах.

В настоящее время разработано достаточно много методик расчетов конструктивных элементов и их соединений на прочность, долговечность, износостойкость материалов, выносливость при различных режимах их нагружения. Так, например, проводятся прогнозные расчеты надежности валов и осей, зубчатых и червячных механизмов, подшипников скольжения и качения, разъемных и неразъемных соединений, уплотнительных элементов и др.

5.1. Оценка надежности машин с использованием структурных схем

При прогнозном расчете и анализе показателей надежности узлов, агрегатов и машин в целом широко используется *метод структурных схем*.

Сущность метода заключается в том, что выполняющие определенные функции конструктивные элементы системы или узла в результате их последовательного или параллельного соединения представляются в виде расчетной конструктивной схемы.

Последовательной называют схему соединения конструктивных элементов, при которой необходимым и достаточным условием нарушения работоспособности является отказ хотя бы одного из них (рис. 5.1, а). Параллельная до отказа системы при таком соединении равна наработке до отказа того элемента, у которого она окажется минимальной:

$$t_c = \min (t_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (5.1)$$

где n — количество элементов системы.

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из n последовательно соединенных элементов, в соответствии с теоремой умножения независимых событий равна

$$P(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (5.2)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_n$ — вероятности безотказной работы элементов, входящих в систему, за наработку t .

Параллельной называют схему соединения, работоспособность которой нарушается при отказе всех входящих в нее конструктивных элементов (рис. 5.1, б). Нарботка до отказа такой системы равна максимальной наработке входящих в нее элементов:

$$t_c = \max (t_i), i = 1, 2, \dots, n. \quad (5.3)$$

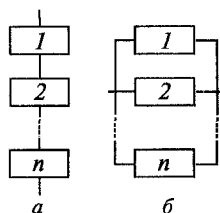


Рис. 5.1. Схемы соединения конструктивных элементов:

а — последовательное;

б — параллельное

Вероятность безотказной работы системы при параллельном соединении элементов составляет

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (5.4)$$

При расчете надежности проектируемое техническое устройство представляется в виде единой структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных соединений конструктивных элементов, выражающих при этом события их безотказности. В качестве примера рассмотрим расчет структурной надежности тормозной системы (ТС) переднеприводного легкового автомобиля, оснащенного АБС (антиблокировочной тормозной системой), которая включает гидроагрегат и четыре датчика скорости вращения колес. На рис. 5.2 показана ее принципиальная (монтажная) схема.

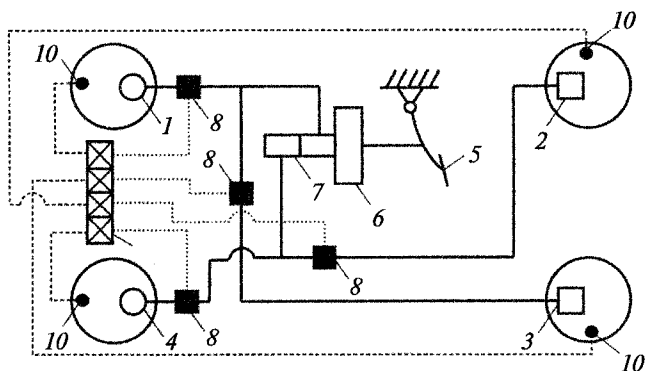


Рис. 5.2. Принципиальная схема тормозной системы автомобиля
ВАЗ-21703-01-018:

1, 4 — дисковый тормозной механизм; 2, 3 — барабанный тормозной механизм;
5 — педаль; 6 — вакуумный усилитель; 7 — главный тормозной цилиндр; 8 — модулятор;
9 — блок управления АБС; 10 — датчик

Датчики вырабатывают сигналы о скорости каждого колеса автомобиля, которые передаются в электронный блок управления гидроагрегата для логической обработки и моделирования управляющих команд, направленных для выполнения в гидромодулятор.

В соответствии с полученными командами гидромодулятор, включая или отключая электромагнитные клапаны, снижает, повышает или удерживает постоянным давление тормозной жидкости в

колесных тормозных цилиндрах, обеспечивая тем самым оптимальное регулирование тормозных сил. При снижении давления излишняя тормозная жидкость перекачивается возвратным насосом в главный тормозной цилиндр.

В случае возникновения параметрического отказа в АБС электронный блок управления отключает систему, исключая вероятность возникновения ошибочного воздействия на орган управления тормозной системой в процессе движения автомобиля. Таким образом, ТС сохраняет свою работоспособность.

На основе анализа принципиальной схемы ТС и функционального назначения входящих в нее элементов составляем расчетную структурную схему надежности ТС (рис. 5.3). Поскольку АБС при возникновении в ней отказа не влияет на работоспособность ТС, на структурной схеме она расположена параллельно основным элементам.

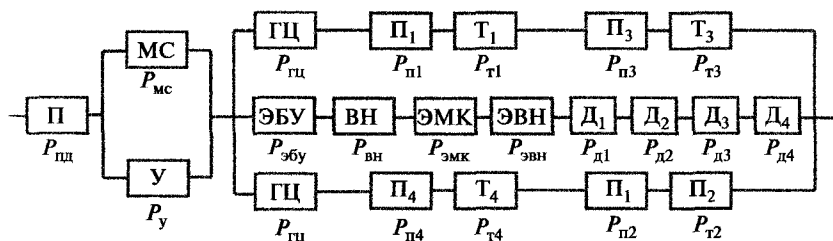


Рис. 5.3. Структурная схема двухконтурной тормозной системы автомобиля ВАЗ-21703-01-018:

П — педаль; МС — механическая связь; У — усилитель; ГЦ — главный тормозной цилиндр; ЭБУ — электронный блок управления АБС; ВН — возвратный насос; ЭВН — электродвигатель возвратного насоса; ЭМК — электромагнитные клапаны; П_г — тормозной привод колеса (рабочий цилиндр с трубопроводом); Т_г — тормозной механизм колеса; Д_г — датчик угловой скорости колеса совместно с ротором

Для количественной оценки надежности рассматриваемой тормозной системы составляем расчетное уравнение вероятности ее безотказной работы:

$$P_{\text{общ}} = (P_{\text{пд}} \cdot (1 - (1 - P_{\text{мс}}) \cdot (1 - P_y)) \times \\ \times (1 - [1 - (1 - (1 - P_{\text{гц}} \cdot P_{\text{п1}}^2 \cdot P_{\text{т1}}^2))] \cdot [1 - P_{\text{эбу}} \cdot P_{\text{вн}} \cdot P_{\text{эмк}} \cdot P_{\text{эвн}} \cdot P_{\text{д1}}^4])], \quad (5.5)$$

где $P_{\text{общ}}$ — общая вероятность безотказной работы всей системы; $P_{\text{пд}}$ — вероятность безотказной работы органа управления (педали); $P_{\text{мс}}$ — вероятность безотказной работы механической связи; P_y — ве-

роятность безотказной работы усилителя; $P_{гц}$ — вероятность безотказной работы главного тормозного цилиндра; $P_{пг}$ — вероятность безотказной работы тормозного привода колеса (рабочий цилиндр с трубопроводом); $P_{тл}$ — вероятность безотказной работы тормозного механизма; $P_{эбу}$ — вероятность безотказной работы электронного блока управления; $P_{вн}$ — вероятность безотказной работы возвратного насоса; $P_{эмк}$ — вероятность безотказной работы электромагнитных клапанов; $P_{эвн}$ — вероятность безотказной работы электродвигателя возвратного насоса; $P_{дл}$ — вероятность безотказной работы датчиков скорости колеса.

При оценке структурной надежности сборочных единиц машин необходимо иметь достоверные количественные характеристики надежности каждого входящего в них элемента. Такие характеристики получают по результатам различных видов испытаний или эксплуатационных наблюдений. При отсутствии данной информации можно решить обратную задачу — зная требуемый уровень безотказной работы рассматриваемого объекта, определяют этот показатель для каждого элемента, входящего в структурную схему.

В различных отраслях машиностроения разработаны классификаторы, в соответствии с которыми все механизмы и системы машин

Таблица 5.1. Результаты расчета вероятности безотказной работы ТС

Класс надежности	Допустимое значение $P(t)$	Принимаемое значение $P(t)$ элементов ТС	Расчетное значение $P(t)$ ТС
0	$<0,9$	0,88 0,89	0,734 0,7752
1	$\geq 0,9$	0,9000 0,9400 0,9605 0,9700 0,9800	0,8059 0,9107 0,9501 0,9649 0,9782
2	$\geq 0,99$	0,9900 0,9950	0,9897 0,9949
3	$\geq 0,999$	0,9990	0,9989
4	$\geq 0,9999$	0,9999	0,9999
5	1	1	1

подразделены на категории по допустимой вероятности их отказа или безотказной работы. В нулевой класс включены узлы и отдельные элементы машин, отказ которых остается практически без последствий. Классы 1—4 характеризуются повышенными требованиями к безопасной работе. В последний, 5-й класс включены изделия с высоким уровнем надежности, отказ которых в заданный период эксплуатации недопустим.

Для узлов и систем автомобилей, непосредственно обеспечивающих безопасность движения, допустимый уровень безопасной работы принимается равным $P(t) = 0,95$.

Используя формулу (5.5), определим вероятности безотказной работы ТС для различных значений $P(t)$ входящих в нее элементов (табл. 5.1).

Из таблицы следует, что тормозная система относится к первому классу надежности, и для обеспечения требуемого (расчетного) уровня безотказности $P(t) = 0,95$ необходимо, чтобы вероятность безотказной работы каждого ее элемента была не ниже $P(t) = 0,9605$.

5.2. Цель и виды испытаний автотранспортных средств

Испытания на надежность являются обязательным и неотъемлемым элементом разработки и изготовления машин. Высокого качества невозможно достичь без проведения всесторонних испытаний агрегатов, узлов, отдельных деталей, а также создаваемой машины в целом. Испытания являются источником достоверных сведений о качестве автотранспортной техники на всех этапах ее жизненного цикла, начиная с разработки проекта и заканчивая утилизацией.

В соответствии с ГОСТ 16504—81 под *испытаниями автотранспортных средств* понимается экспериментальное определение значений параметров и показателей качества в процессе эксплуатации или при имитации их условий.

Как видно из приведенной на рис. 5.4 схемы, на начальной стадии создания автомобиля (проектирование и конструкторские расчеты) сведений о его надежности мало. По мере проведения различных испытаний объем информации постепенно возрастает и достигает максимума только после проведения эксплуатационных испытаний.

Таким образом, испытания на надежность — необходимый этап создания любой машины, тем более что методы расчета при их проек-

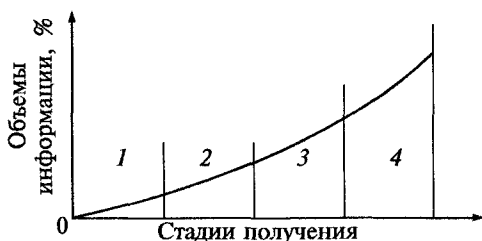


Рис. 5.4. Схема изменения объема информации о надежности изделия на стадиях: 1 — расчеты при проектировании; 2 — доводочные испытания; 3 — испытания серийной партии; 4 — эксплуатационные испытания

тировании развиваются и совершенствуются на основе информации, полученной при испытаниях и эксплуатации. Только объективная информация о фактических показателях надежности АТС, причинах и характере возникновения их отказов, деталях, лимитирующих надежность конструктивных элементов, может стать основой для разработки мероприятий по улучшению их качества.

В зависимости от целей и стадий их проведения они подразделяются на доводочные, исследовательские, приемочные, квалификационные, контрольные и др.

Доводочные испытания выполняют для оценки влияния на надежность различных изменений, вносимых при доводке конструкции изделия. Проводят их до тех пор, пока надежность образца не достигнет необходимого, заданного при проектировании уровня. На рис. 5.5 схематично показаны результаты доводки узла, состоящего из четырех деталей. После проведения необходимых конструкторско-технологических мероприятий γ -процентные ресурсы всех деталей доведены до заданного γ -процентного ресурса проектируемого узла.

После начала серийного производства доводка изделий продолжается. На этом этапе она направлена на устранение тех недостатков, которые не были замечены на опытных образцах или возникли вследствие различного рода ошибок технологии серийного производства (ранние отказы). По мере увеличения наработки машин начинают проявляться более поздние отказы, характер и причины возникновения которых тщательно изучаются, и проводятся соответствующие доводочные работы.

Исследовательские испытания выполняют для углубленного изучения свойств изделий и факторов, влияющих на уровень надежности. К задачам таких испытаний относятся: определение законов рас-

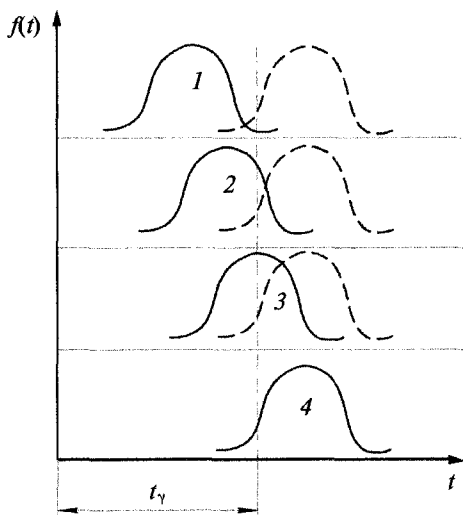


Рис. 5.5. Распределение ресурсов деталей узла:

————— до доводочных испытаний; ----- — после доводки; t_γ — заданный γ -процентный ресурс узла

пределения наработок до отказов; изучение закономерностей развития процессов изнашивания и разрушения; сравнение показателей долговечности или безотказности изделий, изготовленных с применением различных технологий; исследование допустимых напряжений для конкретных сопряжений и др.

Исследовательские испытания широко применяют при разработке новых моделей машин, совершенствовании серийно выпускаемых изделий, оценке новых материалов и технологических процессов, анализе влияния внешней среды на надежность и т. д.

Следует подчеркнуть особую роль исследовательских испытаний в постоянном совершенствовании типовых элементов машин. Если процесс доводки конструкций занимает сравнительно небольшие промежутки времени, ограниченные периодами подготовки машины к производству и ее серийному выпуску, то процесс совершенствования большой группы типовых деталей, узлов, агрегатов, проверенных временем, продолжается практически весь период их эксплуатации. Множество постепенных улучшений приводит к созданию надежных типовых элементов машин, широко используемых при создании новых конструкций. По существу, это процесс тщательной доводки эле-

ментов машин, поэтому не всегда можно отделить доводочные испытания от исследовательских.

Доводочные и исследовательские испытания являются основой технического прогресса в машиностроении, так как они во многом определяют эффективность новой машины и ее потребительские свойства.

Приемочные испытания проводят с целью определения допустимости серийного производства изделий по показателям надежности, т. е. они являются барьером для задержки изделий, уровень надежности которых не в полной мере соответствует требованиям производства.

Квалификационные (установочные) испытания проводятся с целью проверки эффективности мероприятий по устранению дефектов, выявленных в процессе приемочных испытаний. Оценивается соответствие образцов установочной серии техническим условиям и другой нормативно-технической документации.

Контрольные испытания проводятся с целью оценки соответствия машин техническим условиям, стандартам и требованиям конструкторской документации. Проверяется стабильность качества изготовления, сборки, регулировок и пр. Проверяется надежность (безотказность) изделий в пределах определенной наработки (не менее гарантийной), а также эффективность конструкторских и технологических мероприятий, выполненных на производстве для устранения ранее выявленных при контроле недостатков.

Наряду с испытаниями, проводимыми для подготовки машин к серийному производству (доводочные, приемочные, исследовательские и др.) обязательным этапом являются их испытания в процессе эксплуатации. Именно эксплуатация является главной проверкой как надежности, так и функциональных свойств любых изделий машиностроения, выявляющей все недостатки, в том числе не проявившиеся в процессе производства и ранее выполненных испытаний.

Если до начала серийного производства испытывают лишь небольшие группы изделий, то эксплуатации подвергается каждое изделие, изготовленное по серийной технологии. Общее количество таких изделий может достигать десятков тысяч, а для массового производства — сотен тысяч. Поэтому итоговую оценку о свойствах автомобиля данной модели выносят на основании информации о надежности, изучаемой в процессе их эксплуатации.

К автомобилям, как транспортным средствам повышенной опасности, предъявляются ужесточенные требования по показателям на-

дежности. В связи с этим испытания автомобилей на надежность имеют некоторую специфику. Их можно подразделить на два основных вида: дорожные и стендовые.

5.3. Дорожные испытания автомобилей на надежность

Дорожные испытания подразделяются на эксплуатационные, полигонные и специальные.

5.3.1. Эксплуатационные испытания

Наиболее объективную и исчерпывающую информацию о надежности автомобилей и их отдельных элементов дают эксплуатационные испытания, которые проводят в типичных условиях эксплуатации с выполнением присущей им транспортной работы. В зависимости от организации таких испытаний и условий их проведения различают опытную, подконтрольную и рядовую эксплуатацию.

В условиях *опытной эксплуатации* испытания проводятся специально подготовленным персоналом, который осуществляет регулярный контроль и учет наработок автомобиля, объемов выполняемых работ, регистрацию возникающих отказов и неисправностей, определение и уточнение расхода запасных частей, оценку эксплуатационной и ремонтной технологичности.

Подконтрольная эксплуатация предусматривает проведение испытаний в строгом соответствии с требованиями и правилами нормативно-технической документации и контролем технического состояния узлов и агрегатов каждого подконтрольного автомобиля. Для повышения достоверности получаемых результатов эксплуатационные предприятия привлекают к проведению испытаний соответствующих специалистов.

При *рядовой эксплуатации* возможны некоторые отклонения от требований технической эксплуатации, и для получения информации о надежности автомобилей специалисты-испытатели не привлекаются.

Наибольшее распространение и методическое обеспечение получили испытания в условиях подконтрольной эксплуатации автомобилей. Проводят их на специально организованных эксперименталь-

но-производственных предприятиях, называемых опорными. В подконтрольной эксплуатации используется единая методика сбора, представления и обработки информации, что позволяет получать достоверные оценки показателей надежности машин.

Основными задачами эксплуатационных испытаний являются:

- выявление характера и причин возникновения отказов в зависимости от наработки;
- определение коэффициентов готовности и использования;
- обоснование критериев предельного состояния деталей, узлов, агрегатов и, соответственно, их ресурсов;
- установление номенклатуры и норм расхода запасных частей;
- выявление деталей, лимитирующих надежность агрегатов;
- определение затрат на ТО и ремонты;
- изучение приспособленности автомобиля к проведению ТО и ремонта;
- разработка нормативов поддержания автомобилей в работоспособном состоянии.

В процессе таких испытаний неукоснительно выполняется инструкция по эксплуатации автомобилей, регистрируются простои и поломки. Все неисправности, отказы фиксируют с указанием пробега машины до восстановления или замены с момента ввода автомобиля в эксплуатацию до отправки в капитальный ремонт или на списание.

Однако, несмотря на все преимущества, эксплуатационные испытания обладают серьезным недостатком — большой длительностью. Если, например, ресурс автомобиля рассчитан на 400—450 тыс. км, и этот ресурс реализуется в течение 7—8 лет, то выход из строя даже агрегатов, имеющих пониженный ресурс, следует ожидать не ранее, чем через 3,5—4 года.

В связи с этим часто используется метод эксплуатационных испытаний автомобилей, имеющих различную наработку. Например, можно отобрать в группу автомобили, имеющие к началу испытаний разную наработку с начала эксплуатации (30—40, 50—60, 70—80 тыс. км и т. д.). При этом несложно обеспечить необходимую выборку обследований, и практически в течение одного года получить информацию о показателях надежности по большой наработке.

Специфический вид эксплуатационных испытаний — регистрация данных о техническом состоянии автомобилей в процессе ТО и ремонта. Такой вид испытаний позволяет получить исчерпывающую

информацию о надежности автомобилей как в гарантийный, так и послегарантийный периоды их эксплуатации.

Конкретные задачи проведения эксплуатационных испытаний должны быть обусловлены теми целями, которые перед ними ставятся. Для оценки, например, эксплуатационной надежности каких-либо конструктивных элементов автомобиля необходимо решить ряд задач в последовательности, приведенной на рис. 5.6.

Как видно из схемы, важной составляющей экспериментальных исследований по оценке надежности является этап выбора условий

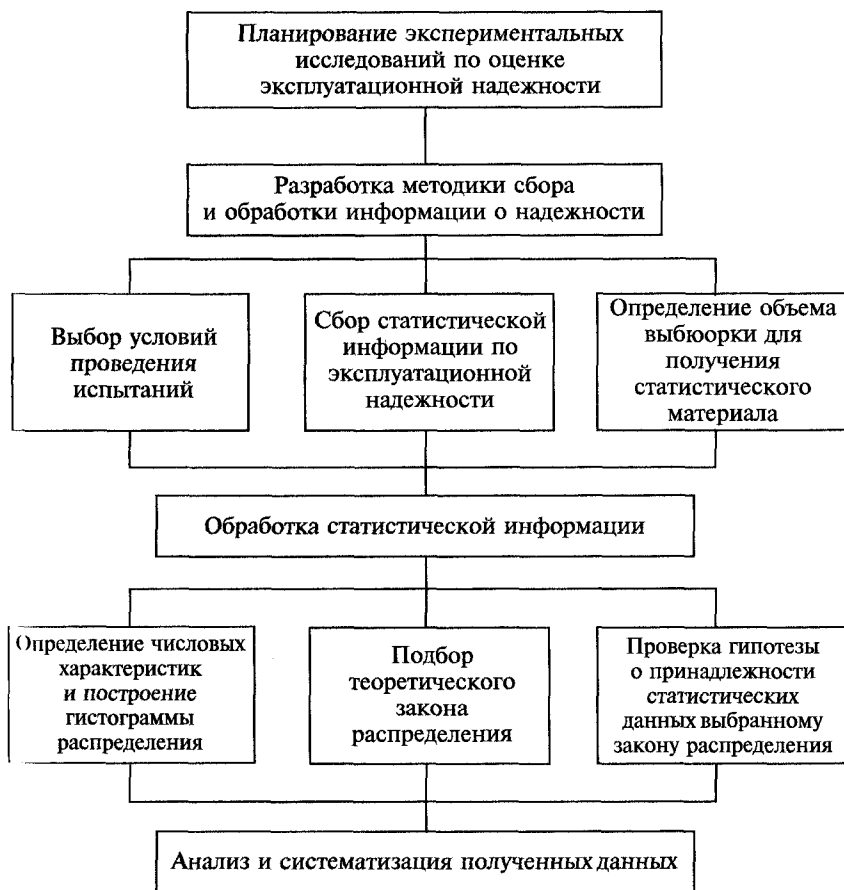


Рис. 5.6. Структурная схема экспериментальных исследований по оценке эксплуатационной надежности

проведения испытаний. Для полного и всестороннего учета многообразия факторов местом проведения экспериментальных исследований следует выбирать реальные условия эксплуатации. Лишь учитывая все многообразие этих факторов, характеризующих климатические и дорожные условия, интенсивность эксплуатации, методы организации обслуживания и ремонта, квалификацию персонала и др., можно получить достоверную оценку эксплуатационной надежности автомобилей.

Желательно также, чтобы испытания проводились на типовом автотранспортном предприятии с налаженной планово-предупредительной системой ТО и ремонта и отлаженной системой учета индивидуальной работы подвижного состава.

Результаты испытаний по эксплуатационной надежности заносятся в специальную ведомость, в которой фиксируется следующая информация: модель АТС, пробег с начала эксплуатации, сведения о выявленных отказах и неисправностях конструктивных элементов с указанием наработки, выполненные технические воздействия, направленные на восстановление работоспособности систем. Обработка статистической информации может осуществляться с помощью специальных программ: Microsoft Excel, STATISTICA и др.

Полученные в результате обработки данные анализируются с целью определения элементов, лимитирующих надежность исследуемого узла или агрегата, средние наработки до отказа, основные причины возникновения отказов и неисправностей и т. д.

В качестве примера на рис. 5.7—5.15 представлены результаты исследований эксплуатационной надежности передней подвески (ПП) автомобилей ВАЗ-21703, полученных на основе анализа статистических данных по наработкам на отказ ее элементов.

Из приведенной на рис. 5.7 диаграммы видно, что наибольшая доля отказов ПП приходится на подшипник верхней опоры — 26,5 %. Далее следуют отказы телескопической стойки — 23,9 %, шарового шарнира нижнего рычага подвески — 22,4 % и подшипника ступицы — 21,6 %. Порядка 5,6 % технических отказов связаны с ослаблением крепежных соединений, изменением геометрии нижнего рычага подвески и др.

Результаты эксплуатационных испытаний показали, что наименее надежным элементом ПП является шаровой шарнир рычага подвески (рис. 5.8, 5.9), средняя наработка до отказа которого составляет $t_{cp} = 38,35$ тыс. км.

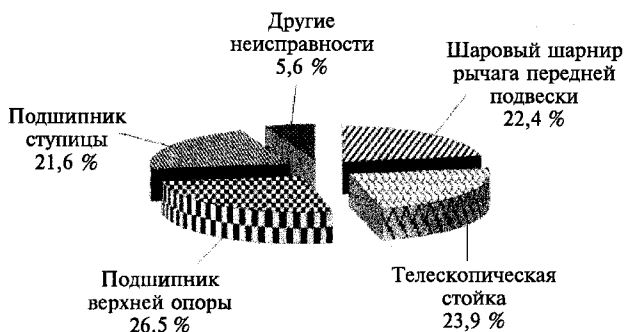


Рис. 5.7. Диаграмма эксплуатационных отказов элементов ПП

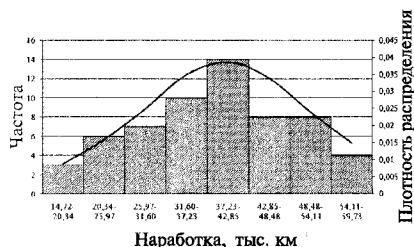
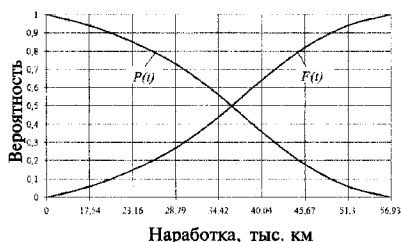


Рис. 5.8. Гистограмма распределения наработок шарового шарнира рычага ПП

Рис. 5.9. Интегральные функции отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$ шарового шарнира

Низкая надежность шарового шарнира, который соединяет ступицу управляемого колеса с рычагом подвески, обусловлена тяжелыми условиями работы. На него воздействуют большие статические и динамические нагрузки, которые резко возрастают при движении автомобиля по неровным дорогам. Это приводит к интенсивному изнашиванию поверхностей трения в сопряжении шаровой опоры и росту зазора между ними. Из-за плохих дорожных условий нередко нарушается герметичность защитного чехла шарнира, в результате чего смазочный материал сопряжения быстро загрязняется, что также интенсифицирует процесс изнашивания.

Невысокой надежностью обладает и подшипник верхней опоры, средняя наработка до отказа которого составляет $t_{ср} = 45,82$ тыс. км (рис. 5.10, 5.11).

Также как и шаровый шарнир, подшипник верхней опоры воспринимает основную часть нагрузок, возникающих при движении ав-

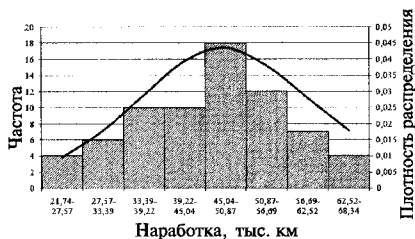


Рис. 5.10. Гистограмма распределения отказов подшипника верхней опоры телескопической стойки ПП

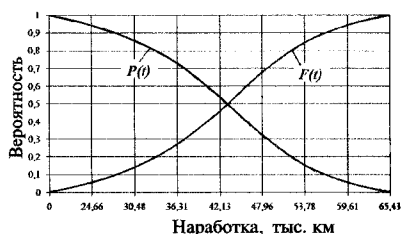


Рис. 5.11. Интегральные функции отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$ подшипника верхней опоры

томобиля по неровностям дороги, и снижает величину силового воздействия на его конструктивные элементы.

Более надежным конструктивным элементом ПП по сравнению с шаровым шарниром и подшипником верхней опоры является телескопическая стойка, средний ресурс до отказа которой составляет $t_{cp} = 69,61$ тыс. км (рис. 5.12—5.13).

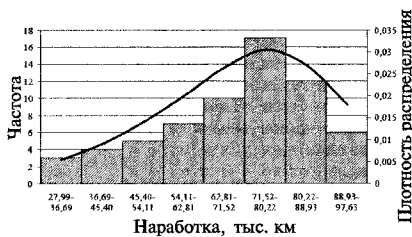


Рис. 5.12. Гистограмма распределения наработок на отказ телескопической стойки ПП

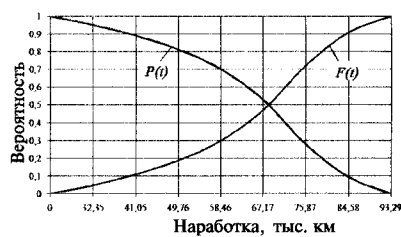


Рис. 5.13. Интегральные функции отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$ телескопической стойки

Основными неисправностями телескопической стойки, из-за которых она теряет работоспособность, являются: износ резиновых подушек растяжек, ослабление крепления их кронштейнов, разрушение резинового элемента верхней опоры стойки, разрушение буфера сжатия, износ штока амортизатора и направляющей втулки.

Анализ эксплуатационных отказов ПП автомобиля ВАЗ-21703 показывает, что наиболее надежным конструктивным элементом является подшипник ступицы, средняя наработка на отказ которого составляет $t_{cp} = 71,69$ тыс. км (рис. 5.14, 5.15). Основной причиной отказа подшипника ступицы является его износ.

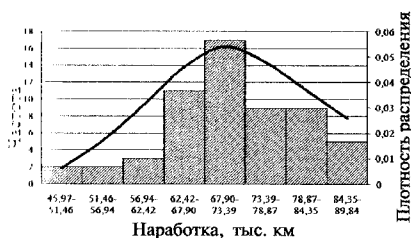


Рис. 5.14. Гистограмма распределения наработок на отказ подшипника ступицы ПП

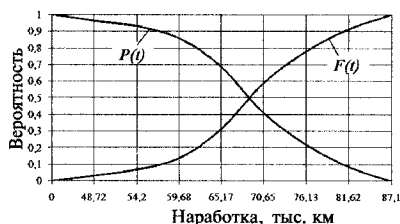


Рис. 5.15. Интегральные функции вероятности отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$ подшипника ступицы ПП

Следует отметить, что замена отказавших деталей, а также последующие контрольно-регулирующие работы позволяют полностью восстановить работоспособность ПП, но довести все ее параметры до номинальных значений практически невозможно из-за накопления различного рода повреждений, возникающих в результате остаточных деформаций, усталости, коррозии и старения материала деталей.

5.3.2. Полигонные испытания

Получение информации о надежности автомобильной техники, являющейся основой оценки их качества, требует все более увеличивающихся испытательных пробегов, затрат труда и, что самое главное, длительного времени. В современных условиях для непрерывного совершенствования конструкций, быстрой смены моделей на более надежные требуются все более сжатые сроки.

Необходимость ускорения испытаний привела к развитию *полигонных испытаний* автомобилей и его агрегатов с целью оценки их возможного ресурса и ускоренного выявления слабых мест. Поэтому уже к началу 50-х годов прошлого столетия практически все крупные автомобилестроительные фирмы за рубежом располагали развитыми испытательными полигонами.

В отечественном автомобилестроении Центральный автополигон ЦАМИ был введен в эксплуатацию в 1964 г. и по своей оснащенности, объемам испытаний занял место одного из крупнейших в мире. Впоследствии, учитывая масштабы и содержание испытательной деятельности, полигон был преобразован в Научно-исследовательский центр по испытаниям и доводке автотехники — НИЦИАМТ.

Проблема ускорения и форсирования испытаний на полигонах решается путем воздействия на элементы автомобиля увеличенных нагрузок и сокращения их времени.

Обобщение результатов испытаний показывает, что в большинстве случаев базовые детали автомобилей повреждаются не из-за недостаточной статистической прочности, а в результате накопления усталости в материале от переменных повторяющихся нагрузок. Зародившиеся первоначально усталостные микротрещины в материале под действием многих тысяч циклов переменных нагрузок развиваются в макротрещины и приводят к разрушению. Выявить показатели безотказности и долговечности тех или иных узлов, агрегатов или автомобиля в целом позволяют испытания на специальных дорогах полигона.

«Шашечная» испытательная дорога — дорога с неровной твердой поверхностью (булыжная или брусчатая, с неровностями в виде брусьев, уложенных поперек полотна) предназначена, в основном, для ускорения проверки долговечности деталей подвески, рамы и других деталей ходовой части, а также кузова. Основным размером профиля является высота отдельных неровностей, которая достигает 10 см. Общее количество неровностей на 1 км дороги — 1250. Испытания автотранспортных средств на таких дорогах сокращает их продолжительность по сравнению эксплуатационными примерно в 20 раз.

Испытательная дорога с косыми волнами предназначена для ускоренного испытания на долговечность узлов и деталей рулевого управления. Интенсивность воздействия на детали рулевого привода зависит от угла между направлением движения автомобиля и образующей профиля неровности. При уменьшении угла интенсивность воздействия на детали рулевого управления возрастает. Для увеличения нагрузки на детали рулевого привода высоту неровностей (не более 7 см) располагают под углом 45° к оси дороги. При таком расположении неровностей достигаются нагрузки на детали рулевого управления в 3—5 раз большие, чем при движении по поперечно расположенным неровностям той же высоты.

Скоростная испытательная дорога с асфальтобетонным покрытием, с плавными поворотами и продольными профильными уклонами, характерными для скоростных автомагистралей, предназначена для ресурсных испытаний автомобилей и автопоездов. Движение по ним на максимальных и близких к ним скоростях позволяет в короткий срок оценить надежность таких агрегатов, как двигатель, подшипни-

ки трансмиссии и ступицы колес, шины, уплотнители вращающихся частей и т. д.

Дорога с покрытием из крупного булыжника предназначена для ускоренной проверки прочности конструкции автомобиля, выявления слабых агрегатов, узлов и деталей, что достигается созданием непрерывных динамических нагрузок различной частоты, действующих на колеса в разных плоскостях.

Ухабистая испытательная дорога используется для форсированных испытаний на прочность рам, несущих корпусов, кабин, балок мостов.

Характерными деформациями, определяющими долговечность несущих систем автомобиля, считаются изгибы в продольной и поперечной плоскостях и скручивание. Эти деформации выделены и циклически повторяются по определенной программе при движении автомобиля через последовательно расположенные серии прямых, косых и клиновых холмов.

Таким образом, полигон НИЦИАМТ имеет весь набор специальных испытательных дорог для ускоренного получения необходимой информации о надежности автомобилей.

Полигонные испытания по сравнению с эксплуатационными сокращаются по пробегу в несколько раз (для деталей подвески в 3—5 раз, кабин — 6—8 раз, рам — 2—3 раза и т. д.). Из табл. 5.2 видно, что продолжительность ресурсных полигонных испытаний в 2—3, а при их форсировании — в 10 и более раз меньше эксплуатационных до полной реализации ресурса [5].

Таблица 5.2. Продолжительность ресурсных полигонных испытаний

Тип автомобиля	Срок службы до капитального ремонта (списания), лет	Продолжительность полигонных ресурсных испытаний, лет	
		нормальных	форсированных*
Легковой	5—6	1—1,5	0,4—0,5
Автобус	8—10	2—3,5	1,0—1,5
Грузовой	10	2—3	1,0—1,5
Многоцелевой	6	2—3	1,5—2,0

* Форсирование при полигонных испытаниях осуществляется за счет переменных механических нагрузжений, коррозионных воздействий, абразивного воздействия в зонах трения и др.

На полигоне разработаны также методики проведения дорожных испытаний автомобилей, при которых их пробег равен ресурсу до капитального ремонта.

Такие испытания при ресурсе, например 300 тыс. км, проводятся ускоренно в течение времени, немногим более полугода за счет непрерывной эксплуатации автомобиля несколькими экипажами.

5.3.3. Специальные испытания

Специальные испытания автомобилей проводятся, как правило, при небольших пробегах на тех режимах движения и при той нагрузке, которые определяются целями таких испытаний. Если при эксплуатационных или полигонных испытаниях автомобиль оборудуется сравнительно небольшим количеством измерительной аппаратуры, то при проведении специальных испытаний для получения максимума информации о тех нагрузках, которые воздействуют на исследуемые агрегаты или детали, такой аппаратуры достаточно много (датчики, мессдозы, акселерометры и другая регистрирующая аппаратура).

Специальные испытания проводятся на обычных автомобильных дорогах и преследуют цель исследовать факторы, влияющие на надежность того или иного агрегата автомобиля. Протяженность таких испытаний составляет обычно от 60 до 80 км.

Результаты специальных испытаний после обработки используются для воспроизведения эксплуатационных условий в стендовых испытаниях.

5.4. Стендовые испытания

Стендовые испытания агрегатов, узлов, отдельных деталей получают все большее развитие, постепенно заменяя при решении ряда технических вопросов дорожные испытания. Особенно возросло значение стендовых испытаний на долговечность и усталостную прочность различных элементов конструкции автомобилей.

Испытания на стендах отличаются от других видов испытаний (полигонных, эксплуатационных, специальных) высокой стабильностью задаваемых и поддерживаемых условий нагружения, температуры, влажности и других факторов, влияющих на функционирование конструкции, возможностями углубленных наблюдений за рабочими

процессами, повышенной точностью их измерения и регистрации. На стендах может быть получена информация, которую не дадут никакие иные испытания, например, графики кривых усталости, показатели прочности деталей и др.

Анализ эксплуатационных отказов показывает, что основными причинами, ограничивающими долговечность узлов и деталей автомобиля, являются изнашивание и усталостное разрушение. Обычно эти процессы развиваются одновременно и взаимосвязано. Поэтому при проведении обычных эксплуатационных испытаний зачастую невозможно получить точные количественные оценки для выработки мероприятий по повышению усталостной прочности и износостойкости элементов до необходимых значений. В связи с этим целесообразнее испытывать отдельные сопряжения или детали, отдельно воспроизводя в стендовых условиях процессы изнашивания или усталостного разрушения.

Стендовым испытаниям подвергаются агрегаты, узлы, механизмы и базовые детали, к которым предъявляются высокие требования к надежности: двигатели, сцепления, коробки передач, карданные передачи, рулевые управления, ведущие мосты, рамы, кузова, кабины, подвески, шины, колеса, ступицы и др. Для таких испытаний используются специальные стенды как индивидуального изготовления, так и серийные, выпускаемые специализированными предприятиями. На рис. 5.16 показана схема современного стенда фирмы «Шенк», на котором одновременно испытываются четыре карданных вала. Такой стенд обеспечивает минимальные затраты энергии, подводимой к нему, благодаря замкнутости силовых контуров.

В подобных стендах условия испытаний максимально приближены к условиям эксплуатации, так как обеспечивается возможность управления процессом нагружения по специально заданным программам. Помимо основного силового нагружения испытываемых узлов программами предусматривается дополнительно воздействие вибраций, температур, различных сред и других факторов, имитирующих реальные условия эксплуатации.

Кроме испытаний агрегатов автомобилей, большое распространение получили стендовые испытания отдельных сборочных единиц и узлов в целях экспериментальной отработки элементов конструкций и сопряжений, для которых практически невозможно определить параметры надежности расчетным путем. Для оценки надежности сравнительно простых узлов и сопряжений, выпускаемых в се-

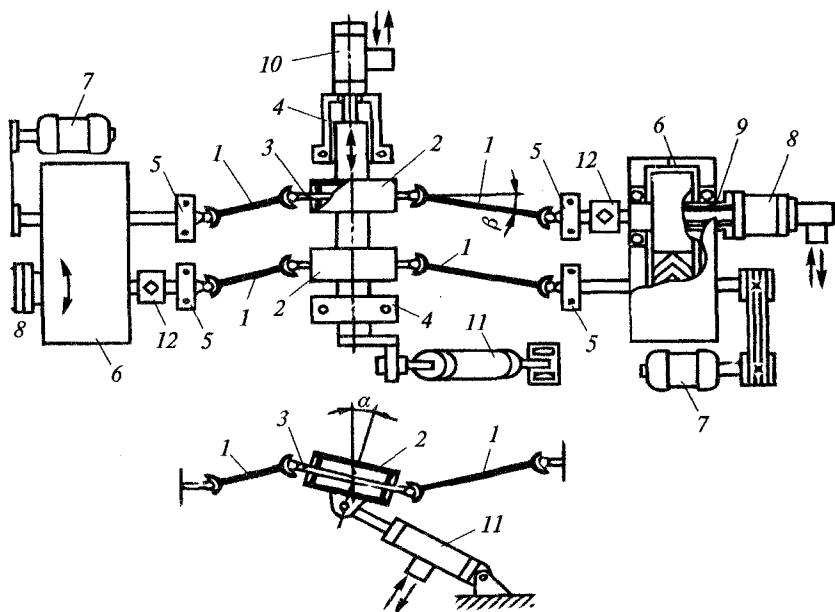


Рис. 5.16. Схема стенда для испытаний карданных валов с программным регулированием вращательных нагрузок, вертикальных и горизонтальных углов передачи момента:

1 — испытываемые валы; 2 — обоймы промежуточных валов; 3 — промежуточные валы; 4 — подшипники цапфы обойм промежуточных валов; 5 — захватные опоры; 6 — зубчатые передачи; 7 — привод вращения; 8 — статор поворотных гидроцилиндров нагружения в контуре; 9 — вал ротора поворотного гидроцилиндра; 10 — гидроцилиндр возвратно-поступательного движения для имитации относительного перемещения кузова и моста; 11 — гидроцилиндр имитации поворотов управляемых колес; 12 — динамометры

рийном или массовом производстве, разработан целый ряд стендов, на которых исследуется долговечность подшипников качения и скольжения, зубчатые передачи, ходовые винты, кулачковые механизмы и т. д.

5.5. Ускоренные испытания

Для сокращения сроков освоения новых моделей автомобилей и экономии средств, идущих на испытания, огромное значение приобретает проблема ускорения испытаний на надежность.

Длительность испытаний изделий определяется отрезком времени от начала постановки их на место проведения до момента, когда полученная информация становится достаточной для достижения целей и решения задач, намеченных программой. Наибольшую длительность, как уже отмечалось, имеют эксплуатационные испытания, по сравнению с которыми и рассматриваются различные виды ускорения.

Для автотранспортной техники ближайшими по содержанию, объему и качеству информации к испытаниям в условиях эксплуатации, но существенно ускоренными являются полигонные испытания.

Еще большее сокращение длительности достигается при стендовых испытаниях, но преимущественно по отдельным агрегатам, узлам, деталям. Эффективность этих испытаний проявляется на этапе доводки конструкции. Основными факторами ускорения стендовых испытаний являются: непрерывность процесса нагружения, одновременное испытание возможно большего числа изделий, сокращение простоев и т. д.

Кроме этого, ускорение испытаний может быть достигнуто за счет повышения точности измерения выходных параметров. При износных отказах, например, не всегда в процессе испытаний необходимо доводить износ детали до предельного состояния. Часто достаточно знать скорость процесса изнашивания, если дальнейшее его протекание во времени определяется известными закономерностями.

Такие методы, как метод поверхностной активации, измерение износов с помощью лазерной техники, применение высокочувствительных датчиков позволяют оценить с достаточной степенью точности скорость процесса при незначительных изменениях исходных параметров изделия.

Дальнейшее ускорение получения информации о надежности автомобилей потребовало разработки различных методов *форсированных испытаний*, основанных на интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения за счет более высоких скоростей, нагрузок, температур и других элементов режима работы изделия. Для автотранспортных средств разработаны такие методы форсирования испытаний, как переменное механическое нагружение, коррозионная среда и абразивное воздействие в зонах трения.

Форсирование механических нагрузок на детали и узлы, подверженные усталостному разрушению, — это повышение их абсолютных значений и частоты воздействий. При доработке главной передачи, например, используется форсирование испытаний методом резких

троганий автомобиля с места с броском педали сцепления на первой передаче и передаче заднего хода. Главная передача выдерживает до разрушения 1500—3000 циклов таких нагружений.

По методике НАМИ при ресурсных испытаниях сцеплений используется следующая методика. Автопоезд с полной нагрузкой устанавливается на подъеме 8 %, затем осуществляется 10 троганий с места на второй передаче с интервалом 30 с. В течение 15 мин сцепление охлаждается, и цикл повторяется. За 6 циклов (60 троганий с места) накладки сцеплений достигают предельного состояния.

При *форсировании коррозионных процессов* испытания проводятся в коррозионных камерах по специальной методике, предусматривающей следующие этапы:

- подготовка кузова (проверка качества и толщины лакокрасочного покрытия, нанесение искусственных очагов коррозии);
- проведение ежедневных циклов испытаний, состоящих из выдержки автомобиля в камере в течение 6 ч, проезда через ванну, заполненную 5%-ным соевым раствором на глубину 100 мм, проезда по пыльным дорогам.

Такие испытания позволяют в короткие сроки оценить эффективность конструкторских и технологических мероприятий по защите автомобилей от воздействия коррозии и разработать методы по повышению коррозионной стойкости кузовов. На рис. 5.17 показан характерный пример результатов наблюдений за развитием коррозионного повреждения по ширине каверны при испытаниях по приведенной методике.

Как видно из графика, распространение коррозионного повреждения в зависимости от количества циклов испытаний носит такой же

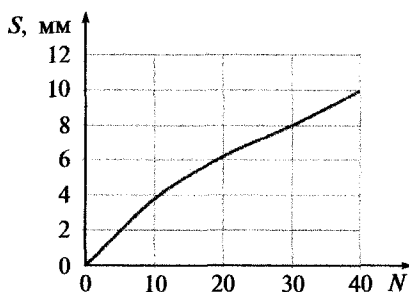


Рис. 5.17. Распространение подпленочной коррозии на передних дверях легкового автомобиля:

N — число циклов испытаний; S — ширина распространения, мм

инейный характер, как и в условиях реальной эксплуатации в зависимости от времени.

Абразивное воздействие на трущиеся поверхности деталей используют для существенного сокращения длительности ресурсных испытаний. Абразивные частицы попадают на трущиеся поверхности в основном с воздухом в виде частиц пыли. Запыленность воздуха является также одной из основных причин загрязнения топлива и смазочного материала.

Абразивные форсированные испытания автомобилей проводятся в сооружении с искусственной пылевой средой — пылевой камере. Продолжительность таких испытаний определяется параметрами и характеристиками искусственной среды (характеристиками пыли), скоростью воздушно-пылевого потока и величиной запыленности воздуха.

Наиболее уязвимым для абразивного изнашивания при работе автомобиля в запыленной среде является двигатель. Интенсивность или скорость его абразивного повреждения определяется износом цилиндров по наработке. Нормативно-технической документацией на различные модели двигателей устанавливаются предельный износ гильз цилиндров и соответствующий пробег для первой категории условий эксплуатации. Для ряда двигателей отечественного производства результаты испытаний представлены в табл. 5.3.

Форсированные испытания автомобилей существенно сокращают длительность получения информации о надежности даже по срав-

Таблица 5.3. Продолжительность форсированных испытаний

Модель двигателя	Наименование показателей			
	нормативный ресурс двигателя, тыс. км	предельный износ цилиндров, мкм	интенсивность форсированного изнашивания цилиндров, мкм /1000 км	суммарная продолжительность испытаний за ресурсный пробег, ч
ВАЗ-2121	100	150	1,58	48
ЗМЗ-24	200	300	0,76	22,6
ЗМЗ-53	200	300	0,49	39,1
ЗИЛ-130	200	350	—	—
ЯМЗ-236, ЯМЗ-238	300	350	1,75	13,4
КамАЗ-740	300	350	0,78	17,7

нению с полигонными (см. табл. 5.2). Следует, однако, отметить, что предельные значения параметров форсирования должны выбираться из условия сохранения физической сущности процесса, из-за которого автомобиль теряет свою работоспособность, т. е. чтобы вид и характер разрушения при работе на повышенных режимах был идентичен виду и характеру разрушения при нормальных условиях эксплуатации.

Эффективность того или иного метода сокращения длительности испытаний характеризуется коэффициентом ускорения

$$K_y = \frac{T_o}{T_y}, \quad (5.6)$$

где T_o , T_y — продолжительность эксплуатационных и ускоренных испытаний, соответственно.

5.6. Определение объема выборки испытаний

Без объективной информации о надежности невозможно определить ее фактические показатели, выявить недостатки проектирования и производства изделия, установить влияние на надежность условий эксплуатации.

Такая информация поступает для анализа и обработки по результатам самых разнообразных испытаний (стендовых, полигонных, эксплуатационных, специальных и т. д.).

Наиболее полную информацию о надежности автомобилей и его элементов, как уже отмечалось, дают эксплуатационные испытания. Подконтрольные автомобили при таких испытаниях подбираются в группы, которые характеризуются однородностью своего возрастного состава и условий эксплуатации. Однако, как показывает практика, показатели надежности у разных автомобилей будут, тем не менее, отличаться друг от друга. Объясняется это влиянием множества различных факторов: качества изготовления, условий эксплуатации, квалификации водителей и ремонтно-обслуживающего персонала, качества эксплуатационных материалов и т. д. Таким образом, работа, при которой возникает отказ, является случайным событием.

Из математической статистики известно, однако, что при многократном повторении наступление случайных событий обладает

статистической устойчивостью, которая возрастает с увеличением количества испытуемых объектов. Естественно, при увеличении числа испытуемых изделий повышается точность оценок статистических характеристик изучаемых величин, и если их достаточно много, можно получить сколь угодно малую ошибку.

Однако чрезмерное увеличение объемов обследований приводит к необоснованному перерасходу трудовых и материальных затрат для получения избыточной информации, которая ничего нового о показателях надежности уже не несет.

В связи с этим целесообразно испытать не просто наперед заданное количество объектов, а ту минимальную партию (представительную выборку), которая с заданной точностью позволяет получить достоверные оценки показателей надежности.

Наиболее распространенным методом определения представительной выборки испытаний является метод доверительных интервалов, который заключается в следующем. По предварительным выборочным характеристикам случайной величины (например, среднего ресурса $\bar{t}_{\text{ср}}$) определяют верхнюю $t_{\text{в}}$ и нижнюю $t_{\text{н}}$ доверительные границы (рис. 5.18). Эти границы и определяют доверительный интервал, который с некоторой доверительной вероятностью α накрывает значение $t_{\text{ср}}$ т. е.

$$\alpha = P(t_{\text{н}} \leq \bar{t}_{\text{ср}} \leq t_{\text{в}}).$$

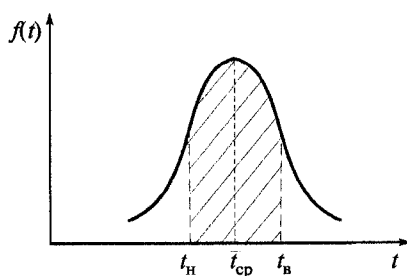


Рис. 5.18. Распределение случайной величины t с доверительными границами

Ширина доверительного интервала характеризует точность выборочной оценки $\bar{t}_{\text{ср}}$, а доверительная вероятность α — достоверность этой оценки. Чем уже доверительный интервал и больше значение α , тем точнее оценка среднего ресурса.

Для нормального распределения случайной величины ресурса t_i доверительные границы по предварительной выборке испытаний определяются из выражений:

$$t_{\text{н}} = \bar{t}_{\text{ср}} - t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad (5.7)$$

$$t_{\text{в}} = \bar{t}_{\text{ср}} + t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (5.8)$$

где t_{α} — коэффициент Стьюдента, определяемый из таблиц нормального распределения при доверительной вероятности α и числе степеней свободы $k = N - 1$; N — объем предварительной выборки.

Выражение $t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \epsilon$ представляет собой точность (или абсолютную погрешность) оценки $\bar{t}_{\text{ср}}$. Если требуется определить математическое ожидание наработки (ресурса) $\bar{t}_{\text{ср}}$ с заранее заданной точностью ϵ и достоверностью α , то минимальный объем выборки, который обеспечит эту точность, находится по формуле

$$N = U_p^2 \sigma^2 / \epsilon^2, \quad (5.9)$$

где U_p — вспомогательная величина (квантиль), определяемая по таблице квантилей нормального распределения в зависимости от

$$\alpha^* = \frac{1 + \alpha}{2}.$$

Необходимая точность ϵ вычисляется по формуле

$$\epsilon = \delta \bar{t}_{\text{ср}}, \quad (5.10)$$

где δ — относительная погрешность (для автотранспортных средств принимается в пределах 5—10 %).

Подставляя значение ϵ в формулу (5.9), получим выражение для минимально необходимого объема выборки:

$$N = \frac{U_p \sigma^2}{(\delta \bar{t}_{\text{ср}})^2}. \quad (5.11)$$

Пример. При наблюдении за девятью автомобилями были получены следующие наработки t_i (тыс. км) до предельного состояния выпускного клапана двигателя ЗМЗ-4063.10: $t_1 = 90$; $t_2 = 105$; $t_3 = 125$; $t_4 = t_5 = 140$; $t_6 = 170$; $t_7 = 185$; $t_8 = 210$; $t_9 = 230$. Требуется определить необхо-

лимый объем выборки обследования с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и относительной погрешностью $\delta = 10 \%$.

1. Вычисляем среднее арифметическое значение наработки выпускного клапана $\bar{t}_{\text{cp}}$ до предельного состояния и среднее квадратическое отклонение

$$\bar{t}_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^9 t_i = \frac{1}{9} (90 + 105 + \dots + 230) = 171,9 \text{ тыс. км};$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t}_{\text{cp}})^2}{N-1}} = \\ &= \sqrt{\frac{(90 - 171,9)^2 + (105 - 171,9)^2 + \dots + (230 - 171,9)^2}{9-1}} = \\ &= 50,5 \text{ тыс. км}. \end{aligned}$$

2. Определяем значение вспомогательной величины U_p . При заданной доверительной вероятности $\alpha = 0,95$

$$\alpha^* = \frac{1+\alpha}{2} = \frac{1+0,95}{2} = 0,975.$$

По таблице квантилей нормального распределения для $\alpha^* = 0,975$ величина $U_p = 1,96$.

3. При относительной погрешности $\delta = 10 \%$ минимально необходимый объем выборки составит

$$N = \frac{U_p^2 \sigma^2}{(\delta \bar{t}_{\text{cp}})^2} = \frac{1,96^2 \cdot 50,5^2}{(0,1 \cdot 171,9)^2} = 33 \text{ ед.}$$

Если ужесточить величину относительной погрешности при оценке $\bar{t}_{\text{cp}}$, например до 5% , то необходимый объем выборки для нашего примера составит

$$N = \frac{1,96^2 \cdot 50,5^2}{(0,05 \cdot 171,9)^2} = 52 \text{ ед.}$$

Таким образом, метод доверительных интервалов позволяет с необходимой точностью и заданной доверительной вероятностью определить представительный объем выборки обследований. Необходимым условием при этом, как уже отмечалось, является знание закона распределения искомой характеристики. При неизвестном законе

может быть использована ориентировочная формула определения объема выборки

$$N = \frac{\ln(1 - \alpha)}{\ln(1 - \delta)}. \quad (5.12)$$

Для нашего примера при уровне доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и допустимой относительной ошибке $\delta = 5\%$ необходимый объем выборки составит

$$N = \frac{\ln(1 - 0,95)}{\ln(1 - 0,05)} \approx 58 \text{ ед.}$$

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные методы получения информации о надежности машин.
2. Раскройте сущность метода структурных схем при расчете надежности изделий.
3. Назовите основные виды испытаний автомобилей на надежность.
4. Какие задачи решаются при испытаниях машин?
5. Перечислите виды дорожных испытаний для оценки надежности транспортных средств.
6. Какие характеристики надежности автомобилей получают при эксплуатационных испытаниях?
7. Назовите основные задачи эксплуатационных испытаний.
8. Изложите сущность методики оценки параметров эксплуатационной надежности.
9. С какой целью проводятся полигонные испытания?
10. Какие процессы физического разрушения деталей исследуются при полигонных испытаниях автомобилей?
11. Какую информацию о надежности получают при стендовых испытаниях?
12. Назовите основные методы и способы ускорения испытаний.
13. Чем оценивается эффективность методов ускорения испытаний?
14. Как определяется объем представительной выборки обследования при определении характеристик надежности?
15. Что понимается под доверительным интервалом и доверительной вероятностью?

Глава 6

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН

6.1. Числовые характеристики случайных величин

Для оценки случайной однородной величины используются два вида характеристик: полные и числовые. Полные характеристики — это так называемые *законы распределения*. Для дискретных величин в качестве таковых используют *функцию и ряд распределения* (графически — многоугольник распределения), для непрерывных величин — *функцию и плотность распределения* (графически — кривую распределения).

Любой закон распределения представляет собой некоторую функцию, которая полностью описывает случайную величину. Однако в целом ряде инженерных задач нет необходимости характеризовать случайную величину полностью (исчерпывающим образом). Зачастую вполне достаточно определить отдельные параметры, характеризующие наиболее существенные черты распределения случайной величины. Такие характеристики, назначение которых — выразить в сжатой форме наиболее существенные особенности распределения, называются числовыми характеристиками случайной величины.

Основными числовыми характеристиками случайной величины являются: среднее арифметическое (выборочное среднее), среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Среднее арифметическое случайной величины характеризует центр группирования всей совокупности ее значений:

$$\bar{X} = (X_1 m_1 + X_2 m_2 + \dots + X_k m_k) / n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i m_i, \quad (6.1)$$

где X_i — центр i -го интервала вариационного ряда; m_i — соответствующая данному интервалу частота; k — количество интервалов вариационного ряда; n — объем выборки обследования.

Среднее квадратическое отклонение случайной величины $\sigma(x)$, характеризующее меру рассеивания значений X вокруг центра группирования $\bar{X}$, определяется по формуле

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 m_i}{n-1}}. \quad (6.2)$$

Коэффициент вариации ряда v оценивает относительную меру рассеивания случайной величины X и в первом приближении позволяет судить о законе ее распределения

$$v = \frac{\sigma(x)}{\bar{X}}. \quad (6.3)$$

Чем меньше значение коэффициента вариации, тем плотнее группируются результаты испытаний вокруг среднего значения $\bar{X}$, тем, следовательно, меньше их рассеивание.

6.2. Законы распределения случайных величин

Результаты испытаний дают возможность найти математическое описание полученных закономерностей, т. е. получить обобщенные зависимости, по которым определяются показатели надежности.

В общем случае в качестве таких обобщенных зависимостей используются интегральные функции распределения случайной величины (законы распределения) $F(x)$ и $P(x)$. Для автотранспортной техники в качестве случайной величины чаще всего используют значение наработки t (до первого отказа, между отказами, до предельного состояния и т. д.). Поэтому при обработке информации о надежности по результатам испытаний вместо абстрактной случайной величины X используется наработка t .

Интегральная функция распределения $F(t)$ показывает вероятность того, что случайная величина наработки T от начала эксплуатации до появления отказа окажется меньше некоторого заданного значения t , т. е.

$$F(t) = \text{Вер} (T < t).$$

Иными словами, эта функция показывает вероятность того, что изделие откажет в заданном интервале наработки.

Интегральная функция $F(t)$ является неубывающей функцией, т. е. $F(t + \Delta t) \geq F(t)$ и изменяется в пределах от 0 до 1. Графическая интерпретация интегральной функции распределения случайной величины наработки представлена на рис. 6.1, а.

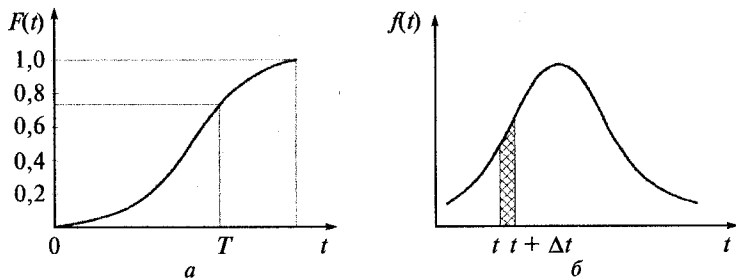


Рис. 6.1. Графическая интерпретация интегральной (а) и дифференциальной (б) функций распределения случайной величины

Интегральная функция $P(t)$ показывает вероятность того, что наработка T от начала отсчета до появления отказа окажется большей или равной заданной наработке t . Иначе говоря, эта функция показывает, что в пределах заданной наработки от 0 до t отказа изделия не произойдет

$$P(t) = \text{Вер}(T \geq t).$$

Теоретические значения интегральных функций $F(t)$ и $P(t)$ определяются из выражений:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt; \quad P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - F(t), \quad (6.4)$$

где $f(t)$ — дифференциальная функция распределения.

Дифференциальная функция $f(t) = dF(t)/dt$ характеризует плотность, с которой распределяются значения случайной величины в данной точке и поэтому называется плотностью распределения случайной величины.

Ее графическая интерпретация показана на рис. 6.1, б.

Физический смысл $f(t)$ применительно к теории надежности — это вероятность возникновения отказа на достаточной малой нара-

ботке. Вероятность того, что наработка до отказа T попадет в интервал $(t, t + \Delta t)$, составит:

$$\text{Вер}(t \leq T \leq t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} f(t) dt. \quad (6.5)$$

Таким образом, функции или законы распределения устанавливают связи между возможными значениями случайных величин и соответствующими им вероятностями.

Если известна одна из функций $F(t)$ или $f(t)$, можно определить любую числовую характеристику надежности. Например, средняя наработка до отказа находится из выражения:

$$t_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt. \quad (6.6)$$

При обработке информации о надежности автомобилей наиболее широкое распространение получили следующие законы распределения: *экспоненциальный, нормальный, логарифмически нормальный, Вейбулла*.

Экспоненциальный закон распределения

Непрерывная случайная величина t считается распределенной по экспоненциальному закону, если ее плотность вероятности определяется выражением:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ при } t \geq 0, \quad (6.7)$$

где λ — параметр закона распределения; e — основание натурального логарифма ($e = 2,7183$); t — случайная величина наработки.

При исследовании надежности машин параметр λ может выражать, например, интенсивность отказов или интенсивность их восстановления.

В общем случае экспоненциальным распределением описываются события, которые возникают с постоянной интенсивностью ($\lambda = \text{const}$) и независимо друг от друга (наработки деталей с внезапным характером отказов, трудоемкость их устранения, интервалы времени между поступлениями автомобилей в зону ремонта и др.).

Графическая интерпретация экспоненциального распределения представлена на рис. 6.2.

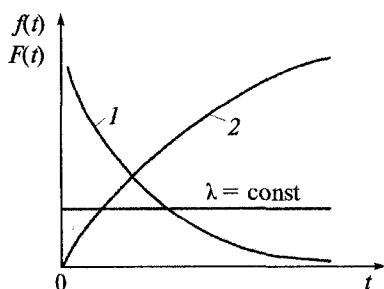


Рис. 6.2. Дифференциальная (1) и интегральная (2) функции экспоненциального распределения

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $F(t)$ на интервале наработки от 0 до t вычисляются из выражений:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (6.8)$$

Средняя наработка до отказа (средний ресурс, средний срок службы, средний срок сохраняемости, среднее время восстановления отказа):

$$t_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.9)$$

Среднее квадратическое отклонение для экспоненциального закона распределения:

$$\sigma = t_{\text{cp}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.10)$$

Коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma}{t_{\text{cp}}} = 1. \quad (6.11)$$

Из выражений (6.7) и (6.8) следует, что интенсивность отказов λ может быть выражена формулой:

$$\lambda = \frac{f(t)}{e^{-\lambda t}} = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (6.12)$$

Нормальный закон распределения

Нормальное распределение — наиболее часто используемое распределение при статистической оценке показателей надежности. Не-

прерывная случайная величина t называется нормально распределенной, если плотность ее вероятности имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (6.13)$$

где t_{cp} и σ — параметры нормального распределения (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение).

Нормальный закон является двухпараметрическим распределением с параметрами t_{cp} , характеризующим положение распределения на оси абсцисс, и σ , оценивающим рассеивание случайной величины относительно среднего значения.

На рис. 6.3 представлена графическая интерпретация кривых нормального распределения с одинаковыми значениями t_{cp} и различными величинами σ . Как видно из рисунка, кривые нормального распределения симметричны относительно ординаты, проведенной через центр группирования случайной величины. При этом с уменьшением σ , соответственно, уменьшается рассеивание значений t , и кривая распределения вытягивается вверх. А так как площадь под кривой распределения должна оставаться равной единице, при увеличении σ кривая становится более плоской.

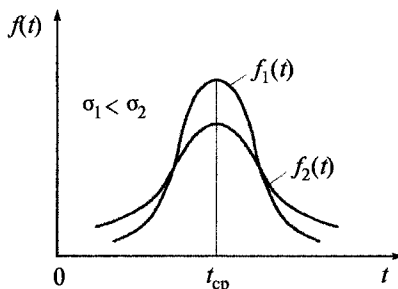


Рис. 6.3. Графическая интерпретация нормального распределения

Интегральная функция нормального распределения описывается выражением:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-t_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2}} dt. \quad (6.14)$$

При решении практических задач надежности для определения значений $f(t)$ и $F(t)$ прибегают к центрированию и нормированию нормального распределения.

Под центрированием понимается перенос центра группирования случайной величины $t_{\text{ср}}$ в начало координат. Тогда $t_{\text{ср}} = 0$, а среднее квадратическое отклонение $\sigma = 1$. Если ввести новую переменную $z = \frac{t - t_{\text{ср}}}{\sigma}$, то такая операция называется нормированием.

В результате центрирования и нормирования получим новое дифференциальное распределение случайной величины z :

$$f_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}. \quad (6.15)$$

Функция $f_0(z)$ является однопараметрической, и ее значения приведены в таблицах нормального распределения. Интегральная функция распределения случайной величины в результате центрирования и нормирования примет вид:

$$F_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (6.16)$$

Функция $F_0(z)$, как и всякая функция распределения, обладает следующими свойствами: $F(-\infty) = 0$; $F(+\infty) = 1$; $F(z)$ — неубывающая функция.

Кроме того, в связи с симметричностью этого распределения с параметрами $t_{\text{ср}} = 0$ и $\sigma = 1$ относительно начала координат следует, что:

$$F(-z) = 1 - F(z). \quad (6.17)$$

После того, как найдены значения $f_0(z)$ и $F_0(z)$, необходимо выполнить обратный переход к исходным функциям $f(t)$ и $F(t)$, который осуществляется по формулам:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} f_0\left(\frac{t - t_{\text{ср}}}{\sigma}\right); \quad (6.18)$$

$$F(t) = F_0\left(\frac{t - t_{\text{ср}}}{\sigma}\right). \quad (6.19)$$

Для упрощения расчетов функции $F(t)$ при статистической обработке информации используется функция Лапласа

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (6.20)$$

Функция $\Phi(z)$ также как и функция $f_0(z)$ протабулирована. Табличное значение функции Лапласа показывает вероятность попадания значений случайной величины в интервал $(0; t)$.

Теоретическая вероятность попадания случайной величины t в интервал $(t_1; t_2)$ при нормальном распределении с использованием стандартной функции Лапласа определяется по формуле

$$P(t_1 < t < t_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{t_2 - t_{\text{ср}}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - t_{\text{ср}}}{\sigma}\right). \quad (6.21)$$

Вероятности отказа и безотказной работы с использованием функции Лапласа определяются из выражений:

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma}\right); \quad P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma}\right). \quad (6.22)$$

Нормальный закон распределения хорошо описывает процессы, на которые влияет большое количество независимых факторов, ни один из которых не оказывает на них преобладающего влияния. Ему подчиняются износные отказы, ресурсы агрегатов и отдельных деталей, люфты и зазоры в сочленениях, трудоемкости обслуживания и др.

Логарифмически нормальное распределение

Непрерывная случайная величина считается распределенной по логарифмически нормальному закону, если логарифм этой величины распределяется по нормальному закону. Плотность логарифмически нормального распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_{\text{л}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - y_0)^2}{2\sigma_{\text{л}}^2}}, \quad (6.23)$$

где y_0 — математическое ожидание логарифма случайной величины; $\sigma_{\text{л}}$ — среднее квадратическое отклонение логарифма случайной величины.

Это распределение в зависимости от параметров y_0 и $\sigma_{\text{л}}$ принимает различные формы для неотрицательных случайных величин. Распределение имеет правостороннюю асимметрию, степень которой возрастает с увеличением $\sigma_{\text{л}}$ (рис. 6.4).

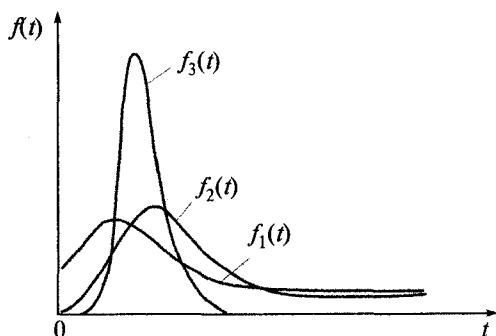


Рис. 6.4. Графическая интерпретация дифференциальной функции $f(t)$ логарифмически нормального распределения ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)

Параметры y_0 и $\sigma_{\text{л}}$ связаны с математическим ожиданием $t_{\text{ср}}$ и средним квадратическим отклонением σ случайной величины t следующими соотношениями:

$$t_{\text{ср}} = e^{y_0 + \frac{\sigma^2}{2}}; \quad (6.24)$$

$$\sigma = \sqrt{e^{2y_0 + \sigma_{\text{л}}^2} (e^{\sigma_{\text{л}}^2} - 1)}. \quad (6.25)$$

При решении практических задач определения показателей надежности также, как и для нормального распределения, прибегают к центрированию и нормированию распределения, т. е. вводу новой переменной $z = \frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}$. Плотность вероятности распределения t с использованием этой переменной определяется по формуле

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_{\text{л}}} f_0\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right). \quad (6.26)$$

Значения $f_0(z)$ приведены в тех же таблицах, что и для нормального распределения.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа при логарифмически нормальном распределении находятся из выражений:

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right); \quad (6.27)$$

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right). \quad (6.28)$$

Логарифмически нормальное распределение описывает наработку на отказы подшипников передних колес автомобилей, процессы усталостных и коррозионных разрушений конструктивных элементов, периодичности крепежных работ и др.

Распределение Вейбулла

Непрерывная случайная величина t называется распределенной по закону Вейбулла, если ее плотность распределения имеет вид:

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \text{ при } t > 0, \quad (6.29)$$

где a — параметр масштаба распределения, характеризующий растянутость кривых вдоль оси t ; b — параметр формы распределения.

Распределение Вейбулла — гибкое распределение и часто принимается в качестве статистической модели для описания самых разнообразных отказов. Хорошо оно проявляется в модели «слабого звена». Например, в двигатель, кроме блока цилиндров, картера, коленчатого вала, поршней, шатунов входят менее долговечные детали: поршневые кольца, вкладыши, прокладки, уплотнения и др. Они отказывают в разные сроки, а наработка двигателя на отказ определяется отказом наиболее слабого звена.

Поэтому распределение Вейбулла занимает особое место при оценке ресурсов работы многих узлов и агрегатов автомобиля. При этом в зависимости от параметра b оно может принимать самые разнообразные формы.

При $b < 1$ — это убывающая функция; при $b \approx 1$ — совпадает с экспонентой; при $b \approx 3,0$ — совпадает с нормальным распределением (рис. 6.5).

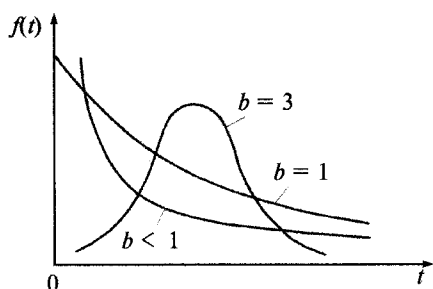


Рис. 6.5. Кривые дифференциальной функции $f(t)$ распределения Вейбулла в зависимости от параметра формы b

Оценка математического ожидания и среднего квадратического отклонения случайной величины, распределенной по этому закону, может находиться различными методами (последовательного приближения на ЭВМ, максимального правдоподобия и др.). Для практических целей используется приближенный метод, в соответствии с которым параметры распределения определяются по формулам:

$$t_{\text{cp}} = ak_{\text{в}}; \quad \sigma(t) = aq_{\text{в}}, \quad (6.30)$$

где $k_{\text{в}}$ и $q_{\text{в}}$ — коэффициенты, определяемые из выражений:

$$k_{\text{в}} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad q_{\text{в}} = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - k_{\text{в}}^2}, \quad (6.31)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция, значения которой протабулированы и приведены в таблицах математической статистики.

Коэффициент вариации случайной величины t определяется по формуле

$$v = \frac{\sigma}{t_{\text{cp}}} = \frac{aq_{\text{в}}}{ak_{\text{в}}} = \frac{q_{\text{в}}}{k_{\text{в}}}. \quad (6.32)$$

Из математической статистики известно, что параметр формы распределения Вейбулла b является функцией коэффициента вариации v , т. е.

$$b = f(v) = f\{\sigma(t)/t_{\text{cp}}\}.$$

Для удобства вычислений при определении параметра формы b , а также коэффициентов $k_{\text{в}}$ и $q_{\text{в}}$ в зависимости от коэффициента ва-

риации v в работах по математической статистике имеются специальные таблицы (для некоторых значений коэффициента v они приведены в табл. 6.1).

Таблица 6.1. Зависимость параметра распределения b и коэффициентов k_b и q_b от коэффициента вариации v

Коэффициент вариации v	Параметр распределения b	Коэффициенты	
		k_b	q_b
0,120	10,0	0,951	0,114
0,170	6,9	0,935	0,159
0,200	5,8	0,926	0,184
0,281	4,0	0,906	0,255
0,315	3,5	0,900	0,285
0,365	3,0	0,893	0,326
0,410	2,7	0,890	0,350
0,500	2,1	0,886	0,443

Если t представляет собой наработку до отказа, то вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность возникновения отказа $F(t)$ до этой наработки находятся по формулам:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}; \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \quad (6.33)$$

Интенсивность отказов определяется выражением:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}. \quad (6.34)$$

6.3. Статистическая обработка информации о надежности

6.3.1. Порядок обработки экспериментальных данных

В первичной документации, где фиксируются результаты испытаний на надежность, содержатся данные, в которых трудно усмотреть какой-либо порядок и закономерности. Обработку этих данных начи-

нают с составления таблицы, в которой их располагают в порядке увеличения полученных при испытаниях значений. Дальнейшую обработку статистической информации проводят в описанной ниже последовательности.

Определяются границы рассеивания опытных данных, т. е. наибольшее $t_{\max}$ и наименьшее $t_{\min}$ их значения. Разность между ними является размахом варьирования

$$R = t_{\max} - t_{\min}. \quad (6.35)$$

Обосновывается количество интервалов k , на которое необходимо разбить размах варьирования R . Число k должно быть не менее

$$k = 1 + 3,32 \lg N, \quad (6.36)$$

где N — объем выборки испытаний.

Находится ширина интервала вариационного ряда h

$$h = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k} = \frac{R}{k}. \quad (6.37)$$

Определяются границы интервалов, для чего вначале устанавливается нулевое (крайнее) значение интервала t_0

$$t_0 = t_{\min} - h/2. \quad (6.38)$$

Следующие границы интервалов рассчитываются последовательным прибавлением величины интервала h к предыдущему значению, т. е.

$$t_1 = t_0 + h; \quad t_2 = t_1 + h; \quad \dots; \quad t_k = t_{\max} + h.$$

В каждом интервале определяется его середина

$$\bar{t}_i = \frac{t_i + t_{i+1}}{2}. \quad (6.39)$$

Находятся опытные частоты $\bar{m}$, представляющие собой число попаданий опытных данных в каждый i -й интервал наработки.

В случае когда отдельные результаты в выборке существенно отличаются по своей величине от остальных, что чаще всего объясняется ошибками испытаний, целесообразно проверить их на аномальность по какому-либо критерию. Из существующих методов проверки чаще всего используют критерий трех средних квадратических откло-

нений (критерий 3σ). В соответствии с ним результат испытаний, возникающий с вероятностью $P \leq 0,003$, относится к аномальному, и его можно квалифицировать промахом. То есть сомнительный результат должен быть исключен из дальнейшего анализа, если его значение выходит за границы допустимой области рассеивания $\bar{t} \pm 3\sigma(t)$.

Если имеется несколько подозреваемых данных, то $\bar{t}_{\text{ср}}$ и σ определяют без них, а затем проводят проверку каждого по приведенной схеме. В случае, когда проверяемые данные находятся внутри доверительного интервала, предположение об их аномальности ошибочно, их следует вернуть в выборку и учитывать при дальнейшем анализе.

Исключив аномальные результаты (если они имеются), по формулам (6.1), (6.2) и (6.3) определяют числовые характеристики статистического ряда: среднее арифметическое $\bar{t}_{\text{ср}}$, среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации v .

Определяются опытные частоты w_i , отражающие вероятности попадания случайной величины t в заданные интервалы наработок

$$w_i = \bar{m}_i / N, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (6.40)$$

Найденные значения опытных частот w_i представляются графически в виде гистограммы. По оси абсцисс гистограммы откладываются интервалы наработок и на их основании строят прямоугольники, высоты которых соответствуют частотам w_i .

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за долговечностью свечей зажигания у 80 двигателей установлены их наработки до отказа в тысячах километров (табл. 6.2). Требуется определить числовые характеристики полученных результатов и построить гистограмму распределения.

Таблица 6.2. Значения наработок свечей зажигания до отказа, тыс. км

21,8; 24,6; 29,2; 32,2; 34,0; 25,7; 27,1; 30,1; 18,6; 28,8; 27,3; 31,2;
26,8; 22,0; 26,2; 33,2; 34,6; 19,4; 13,4; 20,2; 23,1; 32,6; 19,7; 23,9;
22,1; 31,7; 25,5; 26,9; 29,9; 25,7; 30,9; 24,8; 28,6; 21,2; 25,9; 23,8;
23,2; 26,9; 27,9; 31,8; 22,6; 24,1; 21,4; 25,7; 28,8; 23,7; 31,7; 26,6;
26,3; 29,4; 24,7; 21,7; 26,8; 34,9; 40,3; 23,6; 26,5; 27,2; 37,6; 32,9;
35,8; 26,1; 27,6; 22,7; 33,1; 25,5; 32,4; 29,0; 21,9; 24,3; 32,8; 29,1;
26,3; 31,8; 28,9; 35,2; 27,6; 28,3; 22,4; 27,4

По данным табл. 6.2 находим размах выборки:

$$R = t_{\max} - t_{\min} = 40,3 - 13,4 = 26,9 \text{ тыс. км.}$$

Определяем число интервалов:

$$k = 1 + 3,32 \lg N = 1 + 3,32 \lg 80 \approx 9.$$

Находим ширину интервала:

$$h = R/h = 26,9/9 \approx 3 \text{ тыс. км.}$$

Определяем границы интервалов, их средние значения и частоты попаданий опытных данных в интервалы наработок. Полученные результаты сведем в табл. 6.3.

Таблица 6.3. Параметры интервалов наработок свечей зажигания

Параметр	Интервал								
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й
Границы интервалов, тыс. км	12—15	15—18	18—21	21—24	24—27	27—30	30—33	33—36	36—39
Средины интервалов t_i , тыс. км	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5	31,5	34,5	37,5
Опытные частоты $\bar{m}_i$	1	—	4	16	21	17	12	7	2

Значение наработки в первом интервале с наработкой до отказа $t = 13,4$ тыс. км и опытной частотой $\bar{m} = 1$ существенно отличается от остальных экспериментальных данных. Поэтому необходимо проверить ее принадлежность к выборке по критерию 3σ , для чего последовательно определяем:

- среднее арифметическое наработки без подозреваемого результата

$$\begin{aligned} \bar{t}_{\text{ср}} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i \bar{m}_i = \frac{1}{79} (19,5 \cdot 4 + 22,5 \cdot 16 + 25,5 \cdot 21 + 28,5 \cdot 17 + 31,5 \cdot 12 + \\ &+ 34,5 \cdot 7 + 37,5 \cdot 2) = 27,25 \text{ тыс. км;} \end{aligned}$$

- среднее квадратическое отклонение наработки

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \bar{t})^2 \bar{m}_i}{N-1}} = \sqrt{\frac{1484,06}{78}} = 4,37 \text{ тыс. км};$$

- границы допустимого разброса наработок до отказа относительно среднего значения

$$27,25 \pm 3 \cdot 4,37 = [14,14; 40,36].$$

Следовательно, наработка, соответствующая первому интервалу, является аномальной, так как выходит за границы допустимой области рассеивания и должна быть исключена из дальнейшего анализа информации о надежности.

Определяем значение коэффициента вариации:

$$v = \sigma / \bar{t}_{\text{ср}} = 4,37 / 27,25 = 0,16.$$

Используя формулу (6.41), определяем опытные частоты w_i и результаты расчета сводим в табл. 6.4. В таблице количество интервалов k уменьшилось с девяти до семи, так как из дальнейшего анализа исключен аномальный результат.

Таблица 6.4. Результаты расчета частостей w_i по интервалам наработки

Интервал	Границы интервалов, тыс. км	Середина интервала, тыс. км	Частота $\bar{m}_i$	Частость w_i
1-й	18—21	19,5	4	0,0506
2-й	21—24	22,5	16	0,2025
3-й	24—27	25,5	21	0,2658
4-й	27—30	28,5	17	0,2152
5-й	30—33	31,5	12	0,1519
6-й	33—36	34,5	7	0,0887
7-й	36—39	37,5	2	0,0253

По найденным значениям частостей w_i строим гистограмму распределения (рис. 6.6).

В связи с ограниченностью объема выборки обследований в полученном распределении в той или иной мере присутствуют элемен-

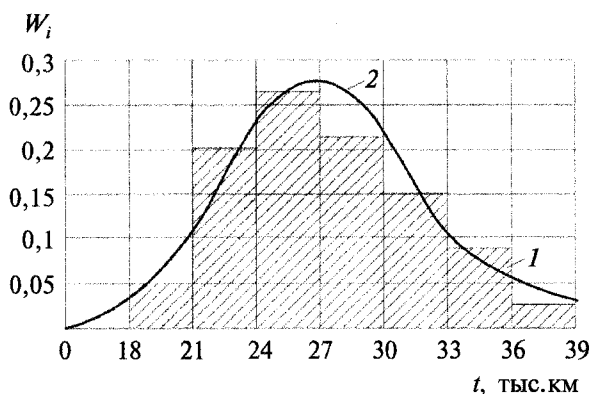


Рис. 6.6. Гистограмма 1 и теоретическая кривая распределения 2 значений наработки свечей зажигания до отказа

ны случайности. Только при очень большом числе статистических данных, что практически осуществить очень сложно, эти элементы случайности сглаживаются. Поэтому при обработке статистических данных возникает задача подбора теоретической кривой распределения к полученной гистограмме.

Такая теоретическая кривая, описывающая распределение случайной величины математической зависимостью, носит название дифференциальной функции закона распределения или плотности вероятностей $f(t)$.

Эта функция не только дает наглядное представление о кривой распределения, но и позволяет определить любую его числовую характеристику.

Сглаживание полученного статистического ряда теоретической кривой в настоящее время не требует сложных и трудоемких расчетов, так как современные компьютерные программы STATISTICA, Microsoft Excel и др. выполняют эти операции с графическим представлением гистограмм и дифференциальных функций $f(t)$. В рассматриваемом примере дифференциальная функция распределения (кривая 2) получена с помощью программы Microsoft Excel.

В первом приближении теоретический закон распределения случайной величины подбирается по виду гистограммы и значению коэффициента вариации v , характеризующего рассеивание случайной величины относительно среднего значения. Известно, что нормальному закону распределения, например, соответствует значение коэф-

фициента вариации $v = 0,10 \dots 0,35$; Вейбулла — $v = 0,4 \dots 0,8$; экспоненциальному — $v = 0,8 \dots 1,2$.

Следует, однако, отметить, что между подобранной теоретической кривой и статистическим распределением всегда имеются некоторые расхождения. Поэтому возникает задача проверки гипотезы о том, что исследуемая случайная величина подчиняется выбранному закону распределения, заданному интегральной функцией распределения $F(t)$ или плотностью распределения $f(t)$.

6.3.2. Проверка гипотезы о принадлежности результатов исследований выбранному закону распределения

Для проверки гипотезы о принадлежности опытных данных выбранному закону распределения существуют соответствующие «критерии согласия» (χ^2 Пирсона, критерий Колмогорова и др.).

Критерий χ^2 Пирсона

Этот критерий нашел широкое применение из-за легкости его использования для проверки согласия любого распределения. Проверка правдоподобия гипотезы о принадлежности результатов испытаний к выбранному закону распределения записывается в виде альтернативного условия

$$\chi^2_{\text{опыт}} = \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i} = \begin{cases} \leq \chi^2_{\text{табл}} \left(\alpha \right); \\ & S \\ > \chi^2_{\text{табл}} \left(\alpha \right), \end{cases} \quad (6.41)$$

где $\bar{m}_i$, m_i — опытное и теоретическое число попаданий опытной случайной величины в i -й интервал; k — количество интервалов; α — уровень значимости; S — число степеней свободы.

Таким образом, критерий χ^2 оценивает меру расхождения между теоретическими и статистическими значениями распределения случайной величины.

Уровень значимости α представляет собой вероятность того, что величина $\chi^2_{\text{опыт}}$ в результате случайных отклонений частот опытного распределения от соответствующих частот теоретического распределения, будет меньше табличного значения $\chi^2_{\text{табл}}$.

Число степеней свободы определяется из выражения

$$S = k - r - 1, \quad (6.42)$$

где r — число параметров теоретического закона распределения.

Критические значения $\chi^2_{\text{табл}}$ в зависимости от наиболее распространенных в инженерных задачах уровней значимости α и числа степеней свободы S приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5. Критические значения критерия χ^2 Пирсона

S	Уровень значимости α				S	Уровень значимости α			
	0,01	0,05	0,10	0,20		0,01	0,05	0,10	0,20
1	6,63	3,84	2,71	1,64	11	24,7	19,7	17,3	14,6
2	9,21	5,99	4,61	3,22	12	26,2	21,0	18,5	15,8
3	11,3	7,81	6,25	4,64	13	27,7	22,4	19,8	17,0
4	13,3	9,49	7,78	5,99	14	29,1	23,7	21,1	18,2
5	15,1	11,1	9,24	7,29	15	30,6	25,0	22,3	19,3
6	16,8	12,6	10,6	8,56	16	32,0	26,3	23,5	20,5
7	18,5	14,1	12,0	9,80	17	33,4	27,6	24,8	21,6
8	20,1	15,5	13,4	11,0	18	34,8	28,9	26,0	22,8
9	21,7	16,9	14,7	12,2	19	36,2	30,1	27,2	23,9
10	23,2	18,3	16,0	13,4	20	37,6	31,4	28,4	25,0

Проверку гипотезы о принадлежности статистического распределения выбранному закону с помощью критерия χ^2 осуществляют следующим образом:

- по построенной гистограмме и коэффициенту вариации v подбирают закон распределения случайной величины;
- находят вероятности попадания случайной величины (теоретические частоты) в каждый интервал статистического ряда;
- по формуле (6.41) определяют опытное значение критерия $\chi^2_{\text{опыт}}$;
- определяют число степеней свободы ($S = k - r - 1$);
- для найденного S и принятого уровня значимости α находят табличное значение критерия $\chi^2_{\text{табл}}$;

- сравнивают вычисленное значение критерия $\chi^2_{\text{опыт}}$ с табличным $\chi^2_{\text{табл.}}$.

Если $\chi^2_{\text{опыт}} \leq \chi^2_{\text{табл.}}$, гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому вероятностному закону не отвергается, т. е. расхождение между опытными и теоретическими частотами незначительно. В противном случае гипотеза отвергается [7].

Критерий Колмогорова

В соответствии с этим критерием определяется максимальное значение модуля разности D между статистической $\bar{F}(t)$ и соответствующей ей теоретической $F(t)$ функциями распределения (рис. 6.7).

$$D = \max |\bar{F}(t) - F(t)|. \quad (6.43)$$

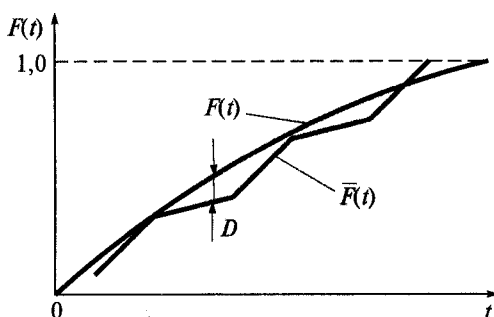


Рис. 6.7. Статистическая $\bar{F}(t)$ и теоретическая $F(t)$ функции распределения

Использование критерия Колмогорова осуществляется по следующей схеме:

- строится статистическая функция распределения $\bar{F}(t)$;
- по виду гистограммы и значению коэффициента вариации v подбирается закон распределения;
- строится теоретическая интегральная функция распределения $F(t)$;
- определяется величина $\lambda = D\sqrt{N}$, и по табл. 6.6 находится вероятность $P(\lambda)$.

Вероятность $P(\lambda)$ — это вероятность того, что за счет случайных причин максимальное расхождение между $\bar{F}(t)$ и $F(t)$ будет не меньше, чем фактически найденное при их сравнении. Если вероятность $P(\lambda)$

Таблица 6.6. Значения вероятностей $P(\lambda)$

λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$
0,0	1,00	0,7	0,711	1,4	0,040
0,1	1,00	0,8	0,544	1,5	0,022
0,2	1,00	0,9	0,393	1,6	0,012
0,3	1,00	1,0	0,270	1,7	0,006
0,4	0,997	1,1	0,178	1,8	0,003
0,5	0,964	1,2	0,112	1,9	0,002
0,6	0,864	1,3	0,068	2,0	0,001

мала (меньше 0,05—0,1), то гипотезу о принадлежности опытных данных к выбранному закону следует отвергнуть как неправдоподобную; при $P(\lambda) \geq 0,6$ ее можно считать совместимой с опытными данными.

Пример обработки опытных данных, распределенных по экспоненциальному закону. По результатам эксплуатационных наблюдений за 41 автомобилем средней грузоподъемности были получены следующие наработки до отказа элементов системы освещения в тысячах километров (табл. 6.7).

Таблица 6.7. Значения наработок до отказа элементов системы освещения

8,7; 14,0; 17,1; 72,7; 14,3; 9,9; 24,2; 26,6; 68,8; 40,1; 89,4; 17,7; 48,1; 14,6; 7,1; 6,0; 22,6; 12,4; 11,6; 18,8; 27,3; 4,4; 9,2; 79,6; 13,4; 19,2; 29,6; 34,2; 37,7; 16,8; 13,8; 2,1; 46,6; 38,0; 11,0; 8,1; 42,9; 42,2; 59,4; 50,9; 103,9

Требуется установить закон распределения наработок, проверить гипотезу о принадлежности опытных данных выбранному закону, построить графики вероятностей безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$.

Все расчеты выполняем с использованием программы Excel.

1. Определяем параметры статистического ряда распределения:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 101,8$ тыс. км;
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg 35 \approx 7$;
- величина интервала $h = R/k = 101,8/7 \approx 15$ тыс. км;
- середины интервалов: $\bar{t}_1 = 7,5$; $\bar{t}_2 = 22,5$; $\bar{t}_3 = 37,5$; $\bar{t}_4 = 52,5$; $\bar{t}_5 = 67,5$; $\bar{t}_6 = 82,5$; $\bar{t}_7 = 97,5$ тыс. км;

- частоты попаданий наработок в эти интервалы: $\bar{m}_1 = 16$; $\bar{m}_2 = 10$; $\bar{m}_3 = 6$; $\bar{m}_4 = 4$; $\bar{m}_5 = 2$; $\bar{m}_6 = 2$; $\bar{m}_7 = 1$.

2. Находим числовые характеристики распределения наработок:

- среднее значение наработки до отказа $t_{cp} = 28,9$ тыс. км;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma = 23,0$ тыс. км;
- коэффициент вариации $v = 0,80$.

3. Строим гистограмму распределения опытных частот $\bar{m}_i$ (рис. 6.8) и по ее виду, а также значению коэффициента вариации $v = 0,80$ предполагаем, что распределение наработок до отказа подчиняется экспоненциальному закону.

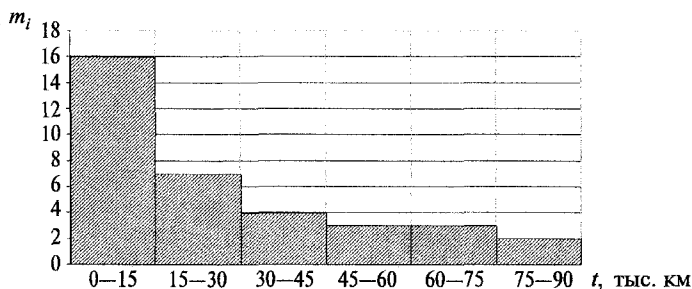


Рис. 6.8. Гистограмма распределения наработок элементов системы освещения до отказа

4. Определяем интенсивность отказов:

$$\lambda = 1/t_{cp} = 0,0351 \text{ тыс. км}^{-1}.$$

5. Рассчитываем вероятности попадания наработок до отказа t в каждый из интервалов (вероятность усеченного распределения)

$$p_{iy} = P(t_i < \bar{t}_i < t_{i+1}) = e^{-\lambda \bar{t}_i} - e^{-\lambda \bar{t}_{i+1}}.$$

$$p_{1y} = 0,409; p_{2y} = 0,241; p_{3y} = 0,143; p_{4y} = 0,088; p_{5y} = 0,052; p_{6y} = 0,026; p_{7y} = 0,018.$$

6. Определяем нормирующий множитель

$$C = 1 / \sum_{i=1}^7 p_i = 1/0,9771 = 1,024.$$

7. Рассчитываем исправленные вероятности $p_i = p_{iy} C$: $p_1 = 0,419$; $p_2 = 0,247$; $p_3 = 0,146$; $p_4 = 0,090$; $p_5 = 0,053$; $p_6 = 0,027$; $p_7 = 0,018$.

8. Определяем теоретические частоты $m_i = p_i N$: $m_1 = 17,179$; $m_2 = 9,881$; $m_3 = 5,863$; $m_4 = 3,608$; $m_5 = 2,132$; $m_6 = 1,066$; $m_7 = 0,738$.

9. По опытным данным находим значение критерия согласия χ^2 Пирсона (табл. 6.8).

Таблица 6.8. Результаты расчета критерия согласия χ^2 Пирсона

Интервал	$\bar{m}_i$	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1-й	16	17,179	-1,179	1,390	0,0809
2-й	10	9,881	0,119	0,014	0,0142
3-й	6	5,863	0,137	1,019	0,1729
4-й	4	3,608	0,392	0,154	0,0427
5-й	2	2,132	-0,132	0,017	0,0080
6-й	2	1,066	0,934	0,872	0,8180
7-й	1	0,738	0,262	0,069	0,0935
Σ	41				$\chi_{\text{опыт}}^2 = 1,230$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $S = k - r - 1 = 7 - 1 - 1 = 5$ табличное значение $\chi_{\text{табл}}^2 = 11,1$. Так как $\chi_{\text{опыт}}^2 < \chi_{\text{табл}}^2$, гипотеза о распределении наработок элементов системы освещения по экспоненциальному закону не отвергается.

9. Определяем значения интегральных функций распределения отказов $F(t)$ и вероятностей безотказной работы $P(t)$ по интервалам наработки (табл. 6.9).

Таблица 6.9. Результаты расчета функций распределения $F(t)$ и $P(t)$

Функция	Интервал						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
$F(t_i)$	0,419	0,666	0,812	0,902	0,955	0,982	1,0
$P(t_i)$	0,581	0,334	0,188	0,098	0,045	0,018	0

10. Используя найденные по интервалам наработки значения $F(t_i)$ и $P(t_i)$, строим графики интегральных функций распределения отказов и вероятности безотказной работы (рис. 6.9).

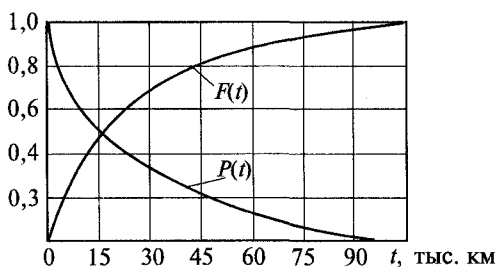


Рис. 6.9. Гистограмма распределения наработок элементов системы освещения до отказа

Пример обработки опытных данных, распределенных по нормальному закону. По результатам эксплуатационных наблюдений за 47 двигателями ЗМЗ-4063.10 были выявлены наработки до отказа вкладышей коренных шеек коленчатого вала (табл. 6.10).

Таблица 6.10. Значения наработок вкладышей коренных шеек коленчатого вала

90, 95, 120, 115, 112, 122, 105, 116, 108, 129, 130, 145, 128, 142, 144, 148, 140, 139, 174, 168, 171, 173, 168, 155, 169, 170, 191, 180, 186, 198, 190, 194, 179, 178, 204, 162, 170, 156, 211, 203, 217, 221, 228, 231, 236, 250, 232

Требуется установить закон распределения, проверить гипотезу о принадлежности статистических данных выбранному закону, определить основные параметры распределения отказов по наработке.

Расчеты выполняем с использованием программы Excel.

1. Определяем параметры статистического ряда распределения:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 250 - 90 = 160$ тыс. км;
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg 47 = 6,5514 \approx 7$;
- величина интервала $h = R/k = 160/7 \approx 25$ тыс. км;
- середины интервалов (тыс. км): $\bar{t}_1 = 87,5$; $\bar{t}_2 = 112,5$; $\bar{t}_3 = 137,5$;
 $\bar{t}_4 = 162,5$; $\bar{t}_5 = 187,5$; $\bar{t}_6 = 212,5$; $\bar{t}_7 = 237,5$;
- частоты попаданий наработок в эти интервалы: $\bar{m}_1 = 2$; $\bar{m}_2 = 7$;
 $\bar{m}_3 = 9$; $\bar{m}_4 = 11$; $\bar{m}_5 = 8$; $\bar{m}_6 = 5$; $\bar{m}_7 = 5$.

2. Находим числовые характеристики выборки:

$$\bar{t}_{\text{ср}} = 166 \text{ тыс. км}; \quad \sigma(t) = 40,6 \text{ тыс. км}; \quad v = 0,24.$$

3. Строим гистограмму распределения частоты отказов вкладышей по наработке t (рис. 6.10).

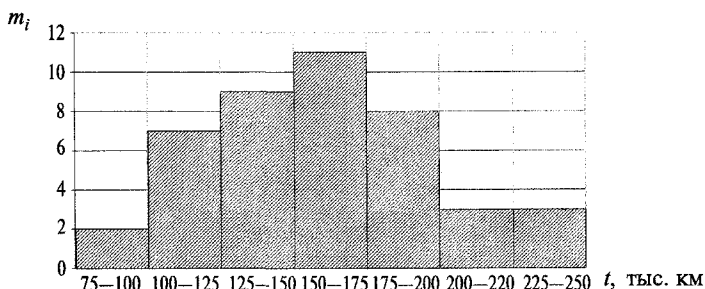


Рис. 6.10. Гистограмма распределения отказов вкладышей коренных шеек коленчатого вала по наработке

По виду гистограммы и значению коэффициента вариации $v = 0,24$ предполагаем, что отказы вкладышей распределяются по нормальному закону.

4. Для удобства вычислений проводим нормирование значения наработки t , т. е. переходим к новой случайной величине $z = \frac{t - \bar{t}_{\text{cp}}}{\sigma(t)}$ и вычисляем границы новых интервалов:

$$z_i = \frac{t_i - \bar{t}_{\text{cp}}}{\sigma(t)}; z_{i+1} = \frac{t_{i+1} - \bar{t}_{\text{cp}}}{\sigma(t)}.$$

Расчеты сводим в табл. 6.11, полагая при этом, что левый конец первого интервала равен $-\infty$, а правый конец последнего интервала ∞ .

Таблица 6.11. Границы интервалов случайной величины z

Интервал	Границы интервала t_i		$t_i - \bar{t}_{\text{cp}}$		Границы интервала z_i	
	t_i	t_{i+1}			$z_i = \frac{t_i - \bar{t}_{\text{cp}}}{\sigma(t)}$	$z_{i+1} = \frac{t_{i+1} - \bar{t}_{\text{cp}}}{\sigma(t)}$
1-й	75	100	—	−66	−∞	−1,63
2-й	100	125	−66	−41	−1,63	−1,01
3-й	125	150	−41	−16	−1,01	−0,40
4-й	150	175	−16	9	−0,40	0,22
5-й	175	200	9	34	0,22	0,84
6-й	200	225	34	59	0,84	1,46
7-й	225	250	59	—	1,46	∞

5. Рассчитываем теоретические частоты

$$m_i = Np_i,$$

где $p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$ — вероятность попадания наработки t в интервалы (t_i, t_{i+1}) ; $\Phi(z)$ — функция Лапласа.

Результаты расчета сведены в табл. 6.12.

Таблица 6.12. Теоретические частоты попадания наработок в интервалы

Интервал	Границы интервала		$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	$m_i = Np_i$
	z_i	z_{i+1}				
1-й	$-\infty$	-1,63	-0,5000	-0,4484	0,0516	2,43
2-й	-1,63	-1,01	-0,4484	-0,3438	0,1046	4,92
3-й	-1,01	-0,40	-0,3438	-0,1554	0,1884	8,85
4-й	-0,40	0,22	-0,1554	0,0871	0,2425	11,40
5-й	0,22	0,84	0,0871	0,2995	0,2124	9,98
6-й	0,84	1,46	0,2995	0,4279	0,1284	6,03
7-й	1,46	∞	0,4279	0,5000	0,0721	3,38

6. Определяем значение критерия согласия χ^2 Пирсона (табл. 6.13).Таблица 6.13. Результаты расчета критерия χ^2

Интервал	$\bar{m}_i$	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1-й	2	2,43	-0,43	0,1849	0,0761
2-й	7	4,92	2,08	4,3264	0,8793
3-й	9	8,85	0,15	0,0225	0,0025
4-й	11	11,40	-0,40	0,1600	0,0140
5-й	8	9,98	-1,98	3,9204	0,3928
6-й	5	6,03	-1,03	1,0609	0,1759
7-й	5	3,38	1,62	2,6244	0,7764
Σ	47				$\chi^2_{\text{опыт}} = 2,317$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $S = k - r - 1 = 6 - 1 - 1 = 4$ табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 9,49$. Так как $\chi^2_{\text{опыт}} < \chi^2_{\text{табл}}$, гипотеза о принадлежности выборочных данных нормальному закону распределения принимается.

7. Рассчитываем вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ на наработках, соответствующих серединам интервалов $\bar{t}_i$

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma}\right); F(t) = 1 - P(t).$$

Результаты расчетов сводим в табл. 6.14 и строим графики интегральных функций распределения (рис. 6.11).

8. Определяем плотность распределения $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ по наработке t

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} f_0\left(\frac{t - t_{\text{ср}}}{\sigma}\right); \lambda(t) = f(t)/P(t).$$

Результаты расчетов значений характеристик $f(t)$ и $\lambda(t)$ приведены в табл. 6.14.

Таблица 6.14. Результаты расчетов значений функций распределения и интенсивности отказов вкладышей по интервалам наработок

Функция	Интервал						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
$P(t_i)$	0,9742	0,9040	0,7580	0,5030	0,2980	0,1260	0,0392
$F(f(t_i), 10^{-3}t_i)$	0,0258	0,0960	0,2420	0,4970	0,7020	0,8740	0,9608
$f(t_i), 10^{-3}$	0,0015	0,0041	0,0077	0,0098	0,0085	0,0051	0,0021
$\lambda(t_i), 10^{-3}$	0,0016	0,0045	0,010	0,0195	0,0285	0,0405	0,0531

9. По найденным интервальным значениям $P(t_i)$, $F(t_i)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$ строим соответствующие графики функций распределения (рис. 6.11 и 6.12).

Пример обработки опытных данных, распределенных по закону Вейбулла. По результатам эксплуатационных испытаний 50 автомобилей средней грузоподъемности установлены наработки до предельного состояния ведомых дисков сцепления (табл. 6.15).

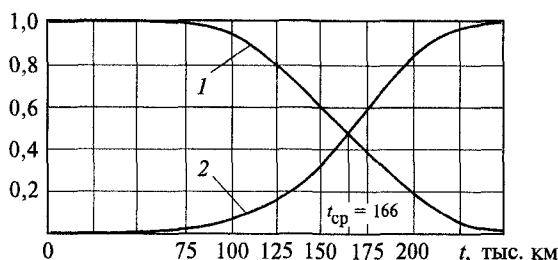


Рис. 6.11. График функции вероятности безотказной работы (1) и вероятности отказов (2)

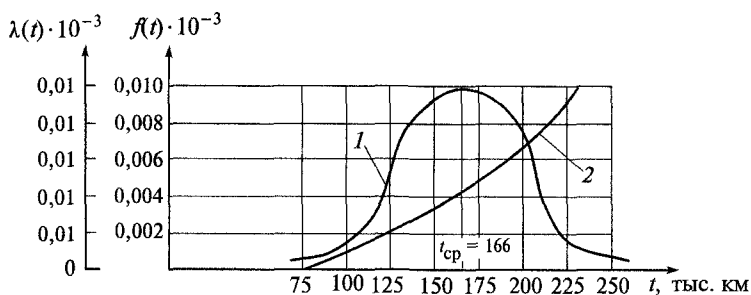


Рис. 6.12. Графики плотности распределения (1) и интенсивности отказов (2) вкладышей шеек коленчатого вала

Таблица 6.15. Значения наработок до отказа ведомых дисков сцепления

36,2; 34,1; 65,3; 45,2; 56,1; 32,0; 42,6; 82,5; 55,4; 24,6; 65,3; 44,7; 61,1; 67,9; 43,0;
61,5; 18,3; 32,2; 45,0; 29,4; 52,6; 53,5; 75,5; 21,0; 102,1; 44,2; 71,4; 31,3; 96,2; 59,8;
69,5; 19,2; 66,3; 75,5; 47,2; 41,1; 72,2; 33,1; 115,0; 43,9; 88,0; 55,2; 47,1; 68,3; 30,3;
54,6; 42,7; 50,4; 81,3; 15,0

1. Определяем параметры статистического ряда распределения:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 115 - 15 = 100$ тыс. км;
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg 47 = 6,6406 \approx 7$;
- величина интервала $h = R/k = 100/7 \approx 15$ тыс. км;
- середины интервалов (тыс. км): $\bar{t}_1 = 22,5$; $\bar{t}_2 = 37,5$; $\bar{t}_3 = 52,5$; $\bar{t}_4 = 67,5$; $\bar{t}_5 = 82,5$; $\bar{t}_6 = 97,5$; $\bar{t}_7 = 112,5$;
- частоты попаданий наработок в эти интервалы: $\bar{m}_1 = 6$; $\bar{m}_2 = 14$; $\bar{m}_3 = 12$; $\bar{m}_4 = 9$; $\bar{m}_5 = 6$; $\bar{m}_6 = 2$; $\bar{m}_7 = 1$.

2. Определяем числовые характеристики выборки:

$$\bar{t}_{\text{ср}} = 54 \text{ тыс. км}; \sigma(t) = 22,4 \text{ тыс. км}; v = 0,41.$$

3. Строим гистограмму распределения частоты отказов (рис. 6.13). По виду гистограммы и коэффициенту корреляции $v = 0,41$ предполагаем, что отказы ведомых дисков согласуются с законом Вейбулла.

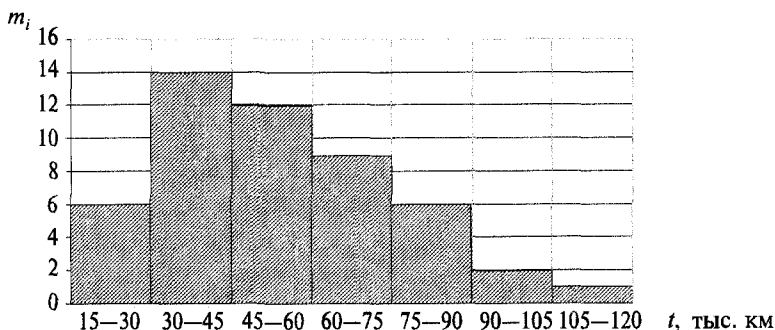


Рис. 6.13. Гистограмма распределения отказов ведомых дисков сцепления автомобилей

4. По таблице значений параметров распределения Вейбулла для коэффициента вариации $v = 0,41$ находим:

- параметр формы распределения $b = 2,7$;
- коэффициенты $k_b = 0,890$ и $q_b = 0,350$;
- параметр масштаба распределения $a = \bar{t}_{\text{ср}}/k_b = 60,7$ тыс. км.

5. Определяем теоретические вероятности попадания случайной величины t_i в интервалы наработки

$$p_i(t_i < t < t_{i+1}) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} - e^{-\left(\frac{t_{i+1}}{a}\right)^b}.$$

$$P(t_1) = 0,12; P(t_2) = 0,224; P(t_3) = 0,263; P(t_4) = 0,210; P(t_5) = 0,110; P(t_6) = 0,038; P(t_7) = 0,035.$$

6. Вычисляем теоретические частоты попадания отказов в интервалы наработки $m_i = p(t_i) \cdot N$:

$$m_1 = 6; m_2 = 11,2; m_3 = 13,2; m_4 = 10,5; m_5 = 5,5; m_6 = 1,9; m_7 = 1,8.$$

7. Проверяем гипотезу о распределении наработок ведомых дисков до отказа по закону Вейбулла по критерию согласия χ^2 Пирсона (табл. 6.16).

Таблица 6.16. Результаты расчета критерия χ^2 Пирсона

i	$\bar{m}_i$	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1	6	6	0	0	0
2	14	11,2	2,8	7,84	0,7
3	12	13,15	1,15	1,3225	0,1
4	9	10,5	1,5	2,25	0,214
5	6	5,5	0,5	0,25	0,045
6	2	1,9	0,1	0,01	0,005
7	1	1,825	0,825	0,681	0,373
Σ	50				$\chi^2_{\text{опыт}} = 1,44$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $S = 4$ критерий $\chi^2_{\text{табл}} = 9,49$. Следовательно, гипотеза о принадлежности опытных данных закону Вейбулла не отвергается, так как $\chi^2_{\text{опыт}} < \chi^2_{\text{табл}}$.

8. Определяем вероятности отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$ по интервалам наработки t_i

$$F(t_i) = \sum_1^i p(t_i); \quad P(t_i) = 1 - F(t_i).$$

Результаты расчета сведены в табл. 6.17 и изображены графически на рис. 6.14.

Таблица 6.17. Результаты расчета функций распределения $F(t)$ и $P(t)$

Функция	Интервал						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
$F(t_i)$	0,12	0,344	0,607	0,817	0,927	0,965	1,0
$P(t_i)$	0,88	0,656	0,393	0,183	0,073	0,035	0
$\lambda(t_i)$	0,0083	0,0200	0,0348	0,054	0,076	0,101	0,128
$f(t_i)$	0,0073	0,0131	0,0137	0,010	0,006	0,003	0

9. Рассчитываем интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность вероятностей распределения $f(t)$ по интервалам наработки t_i

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1}; \quad f(t_i) = P(t_i) / \lambda(t_i).$$

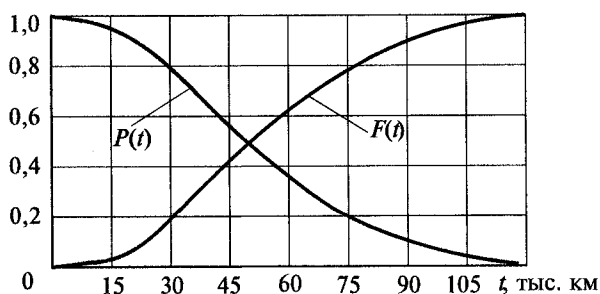


Рис. 6.14. Графики вероятностей отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$ ведомых дисков сцепления

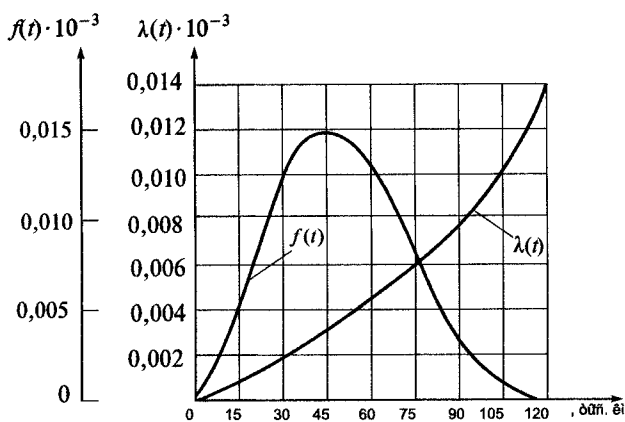


Рис. 6.15. Графики плотности распределения $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ ведомых дисков сцепления

Результаты расчета сведены в табл. 6.17. Графическое изображение кривых $\lambda(t)$ и $f(t)$ представлено на рис. 6.15.

6.4. Обработка информации по результатам незавершенных испытаний

При испытаниях на надежность нередко возникают ситуации, когда к моменту анализа информации не все изделия доведены до предельного состояния. Часть изделий в партии обследования остается работоспособной и, естественно, содержит в себе определенную ин-

формацию о реальных показателях надежности. В этом случае мы имеем дело с незавершенными испытаниями, причинами которых могут быть: неодновременность начала испытаний, большая длительность их проведения, снятие части изделий с испытаний из-за возникновения отказов других элементов, чем изучаемые, аварии и др.

При эксплуатационных испытаниях автомобилей наиболее типичными являются случаи, когда к моменту их завершения в выборке остаются работоспособные изделия, наработка которых до предельного состояния не установлена. Например, при наблюдении за партией автомобилей $N = 30$ ед. на наработке 150 тыс. км отказало 25 исследуемых элементов. Нарботки остальных пяти элементов не установлены, так как испытания этих автомобилей были приостановлены по различным причинам. В этом случае оценка показателей надежности только по 25 отказавшим элементам была бы необъективной, так как не учтены потенциальные ресурсы пяти оставшихся элементов, испытания по которым были приостановлены.

При незавершенных испытаниях обработка информации о надежности осуществляется на основе прогнозирования отказов с учетом наработок оставшихся работоспособных элементов к моменту приостановки испытаний. Для автомобильной техники методика такой обработки изложена в РТМ 37.001.006. Обработка результатов испытаний в этом случае отличается от обработки результатов завершённых испытаний особенностями построения статистического ряда распределения. Эти особенности заключаются в следующем.

Также, как и при завершённых испытаниях, определяются число интервалов наработки и их границы. Составляется таблица распределения наработок отказавших и не отказавших из-за приостановки испытаний изделий по интервалам группировки. Вероятность отказа к концу интервала с учетом не отказавших изделий определяется по формуле

$$F(t) = \frac{m_i}{N+1}, \quad (6.44)$$

где N — общее количество изделий в выборке; m_i — прогнозируемое количество отказов к концу i -го интервала с учетом не отказавших из-за приостановки испытаний изделий.

Прогнозируемое количество отказов m_i определяется из выражения

$$m_i = m_{(i-1)} + k_i n_i, \quad (6.45)$$

где $m_{(i-1)}$ — прогнозируемое число отказов в интервале $(i-1)$; n_i — количество отказавших изделий в i -м интервале; k_i — коэффициент приращения отказов в i -м интервале, который определяется по формуле

$$k_i = \frac{N+1-m_{(i-1)}}{N+1-\sum g_i - \sum n_{(i-1)}}, \quad (6.46)$$

где $\sum g_i$ — общее количество выбывших из-за приостановки испытаний изделий к концу i -го интервала; $\sum n_{(i-1)}$ — общее количество отказов к концу i -го интервала.

Для первого интервала

$$k_1 = \frac{N+1-0}{N+1-g_1-0}; \quad m_1 = k_1 n_1.$$

Для второго интервала

$$k_2 = \frac{N+1-m_1}{N+1-\sum_2 g_i - n_i}; \quad m_2 = m_1 k_2 n_2 \text{ и т. д.}$$

Рассмотрим изложенный метод обработки информации о надежности на конкретном примере.

Пример. При проведении эксплуатационных испытаний на долговечность тормозных накладок передних колес 40 автомобилей средней грузоподъемности были получены и сгруппированы по интервалам наработки до предельного состояния (табл. 6.18). Из выборки 10 автомобилей были сняты с испытаний по разным причинам, не относящимся к отказам тормозных накладок.

Требуется определить показатели надежности тормозных накладок с учетом снятых с испытаний автомобилей.

По формулам (6.44), (6.45), (6.46) рассчитываем значения k_i , m_i , $F(t_i)$ по интервалам наработки.

Для первого интервала

$$k_1 = \frac{40+1}{40+1-0-0} = 1; \quad m_1 = 1 \cdot 1 = 1;$$

$$F(t_1) = \frac{1}{40+1} = 0,024.$$

Для второго интервала

$$k_2 = \frac{40 + 1 - 1}{40 + 1 - 1 - 1} = 1,026; \quad m_2 = 1 + 1,026 \cdot 4 = 5,104;$$

$$F(t_2) = \frac{5,104}{41} = 0,124.$$

Таким же образом рассчитываем k_i , m_i , $F(t_i)$ для остальных интервалов наработки и результаты сводим в табл. 6.18. После того, как определено прогнозируемое количество отказов m_i по интервалам наработки, дальнейшая обработка информации проводится так же, как и при завершенных испытаниях.

Таблица 6.18. Результаты обработки информации при незавершенных испытаниях

Интервал, тыс. км	n_i	Σn_i	g_i	Σg_i	k_i	m_i	$F(t_i)$
20—30	1	1	—	—	1	1	0,024
30—40	4	5	1	1	1,026	5,104	0,124
40—50	11	16	2	3	1,088	17,072	0,416
50—60	9	25	3	6	1,259	28,403	0,693
60—70	3	28	3	9	1,799	33,800	0,824
70—80	2	30	1	10	2,400	38,600	0,941

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные числовые характеристики распределения случайной величины наработки.
2. Что понимается под законом распределения случайной величины?
3. Объясните физический смысл обобщенных зависимостей $P(t)$ и $F(t)$.
4. Раскройте физический смысл дифференциальной функции распределения случайной величины $f(t)$.
5. Какие основные законы распределения используются для обработки информации о надежности автотранспортных средств?
6. Приведите параметры нормального и экспоненциального законов распределения.
7. Какие отказы описываются нормальным законом распределения?

8. Что понимается под центрированием и нормированием нормального распределения?
9. Для описания каких отказов используется распределение Вейбулла?
10. Как проверяются гипотезы о принадлежности опытных данных выбранному закону распределения?
11. Приведите порядок обработки информации о надежности.
12. Как определяются параметры статистического ряда распределения: размах выборки R , число интервалов k и величина интервала h ?
13. Как проверяется гипотеза о принадлежности опытных данных выбранному распределению с помощью критерия согласия χ^2 ?
14. Как изменяются по наработке плотность распределения $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ для распределения Вейбулла?
15. Постройте графики интегральной функции распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работ $P(t)$ для экспоненциального и нормального законов распределения.
16. Как определяются показатели надежности при незавершенных испытаниях?

Глава 7

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ

Одной из главных задач инженерно-технической деятельности при разработке и проектировании продукции машиностроения является создание конкурентоспособных машин. При этом среди многих факторов, определяющих качество и, соответственно, конкурентоспособность машин, особое место следует отвести их надежности.

Приоритетное место надежности машин при их проектировании и изготовлении подтверждается статистическими данными, свидетельствующими о том, что расходы на поддержание их в работоспособном состоянии непрерывно растут. Суммарные ежегодные затраты только на капитальные ремонты технических средств составляют 25—30 млрд руб. Около 30—35 % металлорезающих станков занято изготовлением запасных частей, 20—25 % выплавленного металла расходуется на эти же цели. Численность рабочих, ремонтирующих и обслуживающих автомобили, в 4—5 раз превышает количество рабочих, занятых на производстве новых автомобилей.

Надежность на этапах разработки и производства машин должна рассматриваться как один из важнейших факторов, определяющих их качество и конкурентоспособность. Разработка машин включает несколько этапов: проектирование; конструирование; изготовление опытного образца, его испытание и доводку; постановку на серийное производство; серийное производство.

Все мероприятия, направленные на достижение требуемого уровня надежности изделий, регламентированы **программой обеспечения надежности (ПОН)**. Как правило, программа разрабатывается в виде отдельных документов для каждой стадии жизненного цикла маши-

ны: проектирования, производства и эксплуатации. В том случае когда проектирование и производство изделия осуществляется одним предприятием, ПОН разрабатывается в виде единого документа.

Типовая структура ПОН при проектировании и разработке машины содержит:

- перечень конкретных мероприятий по обеспечению надежности с указанием сроков их выполнения и ответственных исполнителей;
- перечень нормативно-технических и методических документов, которыми следует руководствоваться при выполнении указанных мероприятий;
- виды и формы отчетных документов, отражающих результаты выполнения мероприятий;
- порядок контроля полноты и качества реализации намеченных мероприятий и их корректировка.

ПОН разрабатывается при проектировании машины подразделением главного конструктора с участием подразделений надежности, ОТК, стандартизации и др.

В соответствии с ГОСТ Р 15.201—2000 под **проектированием** понимается процесс разработки машин на уровне чертежей, который включает несколько стадий:

- техническое задание на создание машины, в котором формируются основные требования к надежности и технико-экономические показатели, которые должны быть достигнуты;
- эскизный проект, в котором анализируются требования к надежности, выбираются схемные и конструктивные решения, обеспечивающие выполнение требований по надежности, определяются требования к надежности сборочных единиц, осуществляется предварительный расчет надежности изделия в целом;
- технический проект, включающий выбор оптимального варианта конструкции, разработку программ и проведение испытаний макетов, уточнение показателей надежности, разработку режимов эксплуатации, разработку системы ТО и ремонта, чертежную и текстовую информацию, необходимую для разработки рабочей документации;
- рабочая документация, содержащая анализ технологичности изделия, разработку программ и методик испытаний на надежность, конструкторские расчеты с учетом требований надежности, разработку эксплуатационной и ремонтной документации,

анализ информации о надежности по результатам предварительных испытаний и т. д.

Схема основных мероприятий по обеспечению надежности машин на разных стадиях их проектирования показана на рис. 7.1.



Рис. 7.1. Структурная схема процесса проектирования машины

Конструирование машин включает разработку конструкции деталей и узлов (сборочных единиц), расчеты их кинематики и динамики, тепловые и прочностные расчеты, расчеты на долговечность и безотказность, обоснование периодичностей технического обслуживания, затраты на производство и эксплуатацию.

В связи со значительной сложностью современных машин перед постановкой их на производство изготавливают и подвергают всевозможным испытаниям опытный образец. По результатам испытаний и доводки опытного образца устанавливают технические и эксплуатационные характеристики машины.

7.1. Конструктивные методы обеспечения надежности

Повышение надежности машин при конструировании направлено, главным образом, на увеличение их сопротивляемости внешним воздействиям и включает ряд мероприятий, выполнение которых способствует решению поставленной задачи.

7.1.1. Оптимизация компоновочного решения машины

Одним из основных условий обеспечения высокой надежности машин на стадии проектно-конструкторских работ является оптимизация структурной схемы машины и состава ее основных частей. Эта стадия проектирования носит название *компоновки* машины.

С позиции надежности оптимальной следует считать такое компоновочное решение машины, при котором достигаются высокие показатели ее долговечности и безотказности при минимальных затратах на эксплуатацию. Для решения этой задачи рекомендуется соблюдение следующих основных принципов компоновки машины.

1. Выбор принципиально простых конструктивных схем с минимальным числом структурных единиц и конструктивных элементов машины. С ростом сложности и увеличением количества конструктивных элементов существенно снижаются показатели безотказной работы машины.

2. Ограничение в конструктивной схеме новых, не проверенных и не апробированных в эксплуатации конструктивных элементов и структурных единиц. Использование новых конструктивных элементов в разрабатываемой машине допускается при условии их всесторонних испытаний и доводки до требуемого уровня надежности.

3. Замена конструктивных элементов с низкими показателями надежности, выявленными при эксплуатации аналогов разрабатываемой машины, более надежными.

4. Максимальное использование в разрабатываемой конструкции модульной компоновки машины. Под **модулем** понимается конструктивно и технологически завершенная структурная единица машины одинакового функционального назначения. Модулем машины может быть отдельная деталь, сопряжение, сборочная единица, механизм, агрегат.

Модульная компоновка нашла широкое распространение в автомобилестроении. При разработке, например, легкового автомобиля маркетологи фирмы формируют образ машины, которая будет востребована через несколько лет. Затем конструкторы создают контуры будущего автомобиля и начинают его компоновку. Прорабатывается чертеж с основными размерами автомобиля и расположением пассажиров в салоне, подбираются платформа и основные модули агрегатов, узлов, систем. Основная задача компоновки — оптимальным образом разместить все агрегаты и системы внутри кузова.

Современные компьютерные программы с обширными базами данных позволяют не только выполнить различные варианты компоновок и представить на экране их трехмерное изображение, но и произвести в кратчайшие сроки все необходимые конструкторские расчеты, в том числе на долговечность и безотказность.

5. Обеспечение возможности постоянного или периодического определения технического состояния машины, ее узлов и механизмов в эксплуатации методами диагностирования. Для этого в разрабатываемой машине предусматривается установка встроенных средств диагностирования (датчиков и контрольно-измерительных приборов), а также ее конструкция должна быть максимально приспособлена к оценке технического состояния внешними средствами диагностирования.

Соблюдение перечисленных принципов компоновки автомобилей обеспечивает высокий уровень их эксплуатационной надежности. Однако современные требования к активной, пассивной и экологической безопасности, снижению удельного расхода топлива, удобству управления и комфорту, а также все большее насыщение автомобилей электроникой вступают, как правило, в противоречие с принципами их компоновки, поэтому конструкторы вынуждены постоянно искать компромиссные решения.

7.1.2. Рациональный выбор материалов деталей пар трения

Для изготовления деталей машин и их конструктивных элементов используются самые разные материалы с повышенными механическими характеристиками, так как постоянно растут требования к их надежности. Выбор материала для конкретного конструктивного элемента должен осуществляться с учетом обеспечения его максимальной долговечности и возможности применения наиболее эффективной и экономичной технологии изготовления. Кроме того, необходимо учитывать условия работы деталей узла трения, действующие на них нагрузки, вид изнашивания.

Основными материалами, применяемыми в современном автомобилестроении, являются чугуны и стали. Их доля в общем объеме используемых материалов при производстве легковых автомобилей, например, составляет 50—55 %. Чугун в течение многих лет являлся основным материалом для изготовления блоков цилиндров и головок

блоков двигателя. Обработанные хонингованием внутренние поверхности цилиндров чугунных блоков обладают высокими антифрикционными свойствами и износостойкостью.

Достаточно сложной задачей при конструировании машин является подбор износостойких материалов для деталей узлов трения. Рациональный выбор материалов должен гарантировать, что при нормальных условиях работы не возникнут недопустимые виды изнашивания (молекулярное схватывание, например). При выборе таких материалов к ним наряду с высокой износостойкостью предъявляется ряд требований, к которым, прежде всего, относятся:

- легкая прирабатываемость;
- высокая износостойкость при нормальных условиях работы;
- низкий коэффициент трения;
- отсутствие молекулярного схватывания в условиях несовершенной смазки.

К материалам деталей, подвергающихся при эксплуатации воздействию циклических и динамических нагрузок, наряду с перечисленными, дополнительно предъявляются требования высокой *усталостной прочности и ударной вязкости*. Материалы таких деталей, как шестерни, подшипники, кулачковые валы, крестовины карданных валов и дифференциалов, должны отвечать дополнительно требованию высокой контактной усталостной прочности.

Для повышения износостойкости материалов деталей в парах трения используют разнообразные антифрикционные материалы (рис. 7.2).

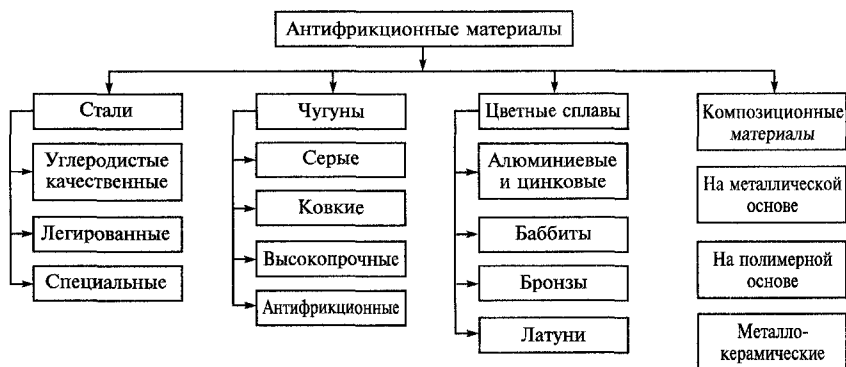


Рис. 7.2. Антифрикционные материалы, используемые в узлах трения

При производстве автомобилей наиболее распространенным материалом в узлах трения, также как и в большинстве деталей, до настоящего являются различные виды сталей.

Углеродистые качественные стали по сравнению со сталями обыкновенного качества содержат меньше серы, фосфора и других вредных примесей, но больше кремния и марганца. Для повышения износостойкости поверхности деталей из углеродистых сталей подвергают различным видам упрочнений (термическая и химико-термическая обработка, пластическое деформирование, лазерная обработка и др.).

Легированные стали используются для изготовления таких ответственных деталей автомобиля, как поршни, поршневые пальцы, оси, валы коробок передач, шестерни, сателлиты, клапана, шатуны и др. Положительные свойства легированным сталям придают легирующие добавки, в качестве которых чаще всего используются хром, марганец, никель, молибден, вольфрам.

К специальным относятся высоколегированные коррозионностойкие и жаропрочные стали, предназначенные для работы в средах с высокой агрессивностью и при высоких температурах. Такие стали используются для изготовления деталей системы питания двигателей, клапанов и др.

Следует иметь в виду, что сопряжения «сталь по стали» имеют низкие антифрикционные свойства и, соответственно, низкую износостойкость. Поэтому сталь в узлах трения используют в сочетании с подшипниками скольжения, выполняемыми из антифрикционных материалов: чугуна, цветных металлов, алюминиевых сплавов, полимерных, керамических и других композитных материалов.

Чугуны наряду со сталями широко используются для изготовления деталей, работающих в парах трения. Высокие антифрикционные свойства им придают включения свободного углерода в виде графита, который за счет своей пористости удерживает смазочный материал на поверхности детали и тем самым способствует снижению интенсивности изнашивания.

Серые чугуны СЧ 20, СЧ 25, СЧ 15-32, СЧ 24-44 и др. применяются в автостроении для изготовления блоков и гильз цилиндров двигателей, распределительных валов и т. д.

Из *ковких чугунов* марок КЧ 35-10, КЧ 37-12 изготавливают различные корпусные детали, крышки коренных подшипников, чашки дифференциалов; из чугунов КЧ 60-3, КЧ 70-2 — коленчатые и распределительные валы, поршни, шатуны.

Высокопрочные чугуны марок ВЧ 40, ВЧ 50, ВЧ 60 и ВЧ 70 отличаются наряду с повышенной прочностью значительной пластичностью и вязкостью. Они служат для производства многих деталей автомобилей: коленчатых и распределительных валов, корпусов и крышек подшипников, ступиц колес, корпусов коробок передач, дифференциалов, редукторов и др.

Цветные сплавы находят все большее распространение при изготовлении деталей машин. Необходимость создания более легких двигателей, например, привело к разработке блоков и головок блоков цилиндров из *алюминиевых сплавов*.

Использование в двигателестроении современных технологий позволяет производить алюминиевые легкие блоки цилиндров без установки в них гильз из чугуна и других износостойких материалов. При отливке блока за счет специального режима охлаждения происходит направленная кристаллизация кремния на рабочих поверхностях цилиндров. Затем цилиндры подвергают химическому травлению, в процессе которого с их поверхностей удаляется небольшой, в несколько микрон, слой алюминия. В результате на рабочих поверхностях образуется пористая, хорошо удерживающая смазку пленка чистого кремния, которая при работе в паре с хромированными поршневыми кольцами обладает исключительно высокой износостойкостью (рис. 7.3).

Кроме блоков, из алюминиевых сплавов изготавливают поршни, шатуны, тормозные цилиндры, барабаны и другие детали автомобилей.

Цветные сплавы являются наиболее распространенными материалами для изготовления подшипников скольжения. К вкладышам подшипников скольжения, которые являются их основными конструктивными элементами, предъявляется ряд специальных требований. Они должны иметь низкий коэффициент трения, высокую износостойкость, хорошую прирабатываемость, высокую теплопроводность, легко адсорбировать и удерживать на своей поверхности смазочный материал.

В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют *бabbиты* — сплавы на свинцовой и оловянной основе с

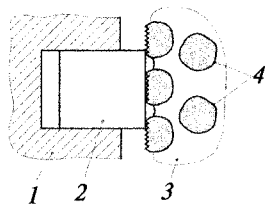


Рис. 7.3. Схема взаимодействия поршневого кольца с рабочей поверхностью цилиндра: 1 — поршень; 2 — поршневое кольцо; 3 — цилиндр блока из алюминиевого сплава; 4 — кристаллы кремния

добавлением меди, сурьмы и других элементов; *оловянистые и свинцовистые бронзы; антифрикционные чугуны; сплавы на цинковой и алюминиевой основе.*

В современном автостроении широкое распространение получили многослойные подшипники скольжения. Основой вкладыша в них является стальная лента, а рабочим слоем — бронзы, баббиты и другие материалы, обеспечивающие необходимые антифрикционные свойства.

Весьма перспективными материалами для деталей пар трения являются цинковые сплавы с добавлением алюминия и магния. Они прочнее сплавов на основе алюминия, отличаются высокой износостойкостью и демпфирующей способностью.

Композиционные материалы, состоящие из двух и более разнородных по химическому составу и структуре компонентов, являются достаточно перспективными материалами для деталей пар трения. Они состоят из матрицы, являющейся связующим материалом, и частиц различных наполнителей, в качестве которых используются металлы, силикаты, полимеры и др. В зависимости от применяемых при производстве материалов матрицы подразделяются на два вида: с металлической и неметаллической (полимерной) основой.

Из композиционных материалов на металлической основе при производстве автомобилей наиболее широко используются *порошковые спеченные материалы*. Матрицами для них служат порошки сталей, бронзы, алюминия, магния и др. Они обладают хорошей износостойкостью, низким коэффициентом трения, легкой прирабатываемостью. Из них изготавливают подшипники скольжения, трущиеся детали амортизаторов, втулки, шайбы опорных подшипников, вкладыши наконечников реактивных тяг и другие конструктивные элементы автомобилей.

Основой неметаллических композиционных материалов являются полимеры. *Полимерные материалы* прочно прописались в современных автомобилях, вытесняя сталь, чугун и цветные металлы из двигателя, шасси и кузова. Уже сейчас при изготовлении легковых автомобилей, например, из полимерных материалов изготавливается 12—13 % деталей. Их применение позволяет не только существенно уменьшить массу автомобиля, но и повысить надежность и долговечность.

Механические свойства полимерных материалов обеспечиваются за счет использования в качестве наполнителя тканей стекловолокну-

тов, стеклянных нитей, углеродных волокон, специальных порошков и т. д. Из них делают подшипники скольжения, зубчатые колеса, шкивы, втулки, кулачковые механизмы.

Изготовленные американской фирмой «Polimotor Research» опытные двигатели из композитных полимеров на основе стеклоугле-волокну фенольной смолы существенно легче (табл. 7.1) и технологичнее при производстве. Фенольная смола, усиленная стекловолокном, обладают высокой прочностью и жесткостью. Детали из этого материала отличаются высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения и легкой прирабатываемостью, что позволяет значительно увеличить ресурс двигателя при одновременном уменьшении массы двигателя примерно на 50 %.

Таблица 7.1. Масса деталей двигателя из различных материалов

Наименование детали	Композитный материал, г	Сталь, г	Алюминиевый сплав, г
Блок цилиндров	14 000	41 000	23 000
Головка блока	10 000	25 000	17 000
Поршень	250	—	500
Поршневой палец	50	140	—
Шатун	400	800	550
Толкатель	25	75	—
Клапанное коромысло	150	400	300
Впускной клапан	20	100	—
Колпак клапанного механизма	230	1800	900
Распределительная шестерня	340	900	450

Металлокерамические материалы используются для изготовления деталей узлов трения, функционирующих в условиях высоких температур и агрессивных сред, а также при отсутствии смазочного материала.

В автомобилестроении все большее распространение получают металлокерамические материалы, представляющие собой композиты на основе окислов алюминия, кремния и магния. Изготовленные, например, из керамических волокон с наполнителем из алюминиевого сплава поршни отличаются высокой износостойкостью.

7.1.3. Оптимизация геометрической формы деталей узлов трения

Практика эксплуатации автомобилей показывает, что геометрическая форма деталей узлов трения, как правило, не является оптимальной и приобретает ее только после завершения определенного периода изнашивания. В этот период происходит преобразование технологического рельефа поверхностей сопряженных деталей в эксплуатационный, т. е. их микро- и макрогеометрическая приработка. В результате достигаются оптимальные шероховатость и геометрическая форма деталей узла трения, характерного для периода нормального изнашивания. При этом продолжительность периода приработки, которая определяется не только материалами деталей, но и в значительной степени точностью обработки сопряженных поверхностей, их геометрической формой, оказывает существенное влияние на ресурс узла трения.

В связи с этим минимизация периода приработки, непосредственно связанная с приданием поверхностям деталей кинематической пары формы, соответствующей форме периода нормального изнашивания уже в процессе их разработки, является одним из направлений повышения их надежности.

На рис. 7.4 показана графическая интерпретация изменения ресурса узла трения после модернизации его геометрической формы. В результате, как следует из схемы, продолжительность периода приработки $t_{\text{пр}}$ уменьшилась до значения $t'_{\text{пр}}$, а ресурс T_p существенно увеличился (T'_p).

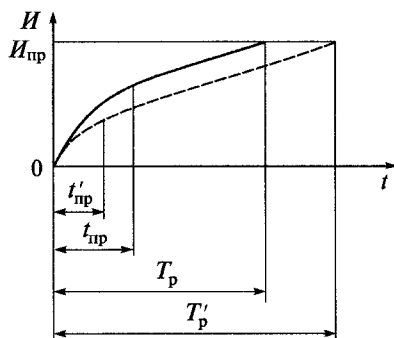


Рис. 7.4. Схема изменения процесса изнашивания в результате изменения геометрической формы

Благодаря изменению формы коленчатых валов, клапанов, поршней, блока цилиндров и других деталей существенно повышается ресурс двигателей. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) с их широкими функциональными возможностями позволяют существенно ускорить процесс оптимизации геометрических форм элементов самых различных агрегатов и узлов автомобиля.

7.1.4. Обеспечение нормальных условий работы

Для обеспечения нормальных условий работы деталей необходимо, прежде всего, определить рациональные размеры контактирующих поверхностей, их геометрическую форму, рассчитать действующие нагрузки и другие параметры сопряжений, обеспечивающие *наименьшие потери на трение*.

Поверхности подшипников скольжения, например, рассчитывают на удельные нагрузки; поверхности шлицев и опор валов — на смятие; фрикционные пары — на нагрев; рессоры — на усталостную прочность и т. д.

Для обеспечения минимальных потерь на трение при конструировании стремятся вместо подшипников скольжения, если позволяют условия, использовать подшипники качения. Это повышает надежность узла, снижает пусковые моменты, уменьшает расход цветных металлов, упрощает обслуживание. Вместе с тем следует учитывать, что подшипники качения выдерживают меньшие скорости и нагрузки, снижается их сопротивляемость вибрациям.

В этом отношении более надежными являются конические двухрядные роликовые подшипники, которые, например, начинают вытеснять шарикоподшипники в ступицах колес легковых автомобилей. Такие подшипники более надежны, так как у роликов увеличена площадь контакта с кольцом, и возникающие при эксплуатации нагрузки распределяются значительно равномернее. Как показали стендовые испытания в режиме форсированных нагрузок, долговечность роликовых подшипников в несколько раз превышает долговечность шариковых.

Существенное влияние на интенсивность и характер изнашивания оказывает температурные условия рабочих процессов. В связи с этим обеспечение *оптимальных тепловых режимов* работы различных

сопряжений, узлов и агрегатов автомобилей играет существенную роль в повышении их долговечности. Оптимизация теплового режима работы с целью минимизации интенсивности изнашивания особенно важна для такого нагруженного агрегата, как двигатель.

Регулирование температуры нагрева деталей двигателя осуществляется за счет охлаждения жидкостей (или воздуха) и картерного масла, а также за счет различных конструктивных решений. К ним прежде всего следует отнести: создание теплоизолирующих прорезей (в головках блока и поршнях); заполнение пустотелых впускных клапанов металлическим натрием, использование управляемых электроникой термостатов; охлаждение днищ поршней струей масла из специальных форсунок в блоке цилиндров.

На современных тяжелых грузовиках внедряются такие конструктивные решения, как отключение вентилятора зимой или при прогреве с помощью фрикционной пневмоуправляемой муфты, электроподогрев двигателя, регулирующий температуру масла водомасляный теплообменник, специальный радиатор для охлаждения редуктора главной передачи и т. д.

К мероприятиям по обеспечению нормальных условий работы относятся конструкторские разработки по *оптимизации смазки трущихся поверхностей*. В конструкциях современных машин стремятся обеспечить жидкостное или, по крайней мере, граничное трение сопряженных деталей, снижающих интенсивность их изнашивания. У современных двигателей все основные сопряжения смазываются под давлением. Этот прогрессивный вид смазки все шире используется и в других механизмах автомобиля, например, в трансмиссии.

Обеспечение оптимальных условий изнашивания в зоне трения предусматривает *создание высококачественных устройств для очистки масел, топлива и воздуха*. Эффективность фильтров очистки зависит в основном от качества и количества используемой в них специальной (пропитанной и термически обработанной) фильтрующей бумаги и оценивается тонкостью очистки, т. е. размером задерживаемых микрочастиц загрязнения.

Особо высокие требования предъявляются в настоящее время к масляным фильтрам, которые наряду с высокой степенью очистки (до 10—20 мкм) должны обеспечивать гарантированное прохождение масла через фильтрующий элемент, устойчивость против давления, надежную работу обратного и перепускного клапанов. Применение таких фильтров позволяет повысить ресурс двигателя на 20—25 %.

7.1.5. Повышение уровня ремонтпригодности

Ремонтпригодность, как уже отмечалось, является одним из основных свойств надежности машин. Поэтому совершенствование конструкций машин в направлении повышения уровня их ремонтпригодности представляется весьма перспективным направлением повышения их надежности. От того, насколько автомобиль приспособлен к проведению ремонтных и профилактических работ, в значительной степени зависят затраты на его эксплуатацию. При этом в *программе обеспечения надежности* при разработке конструкции автомобиля разделяют такие понятия ремонтпригодности, как:

- эксплуатационная технологичность;
- ремонтная технологичность.

Эксплуатационная технологичность представляет собой свойство конструкции автомобиля, характеризующее его приспособленность к поддержанию работоспособности, т. е. проведению всех видов ТО.

Ремонтная технологичность характеризует приспособленность автомобиля к ремонтным работам, осуществляемым для восстановления утраченной работоспособности с целью обеспечения заданного ресурса.

Ремонтпригодность автомобиля определяется его контролепригодностью, а также доступностью, легкосъемностью, взаимозаменяемостью, преемственностью технологического оборудования.

Контролепригодность — свойство автомобиля, заключающееся в его приспособленности к контролю технического состояния методами технической диагностики.

Доступность конструкции узлов автомобиля — свойство, характеризующее их приспособленность к быстрому и удобному осуществлению технологических операций при устранении отказов, проведении ТО и ремонтов.

Легкосъемность — свойство конструкции автомобиля, характеризующее приспособленность к выполнению операций разборки и сборки, необходимых для замены отказавших деталей.

Преемственность оборудования определяет возможность использования уже имеющегося на предприятиях автомобильного транспорта оборудования для выполнения операций ТО и ремонта автомобилей новых моделей.

Программа обеспечения ремонтпригодности устанавливает комплекс взаимосвязанных организационно-технических мероприятий,

направленных на обеспечение заданных требований к ремонтпригодности и (или) его повышению. При конструировании автомобилей они должны отвечать ряду требований к эксплуатационной и ремонтной технологичности, к основным из которых можно отнести:

- доступность узлов, агрегатов и механизмов при проведении контрольно-диагностических, регулировочных и других операций ТО и ремонта с минимальными затратами времени и средств;
- максимальное использование стандартных узлов и конструктивных элементов, хорошо зарекомендовавших себя в уже существующих моделях автомобилей, и минимизация количества их типоразмеров;
- простота проведения разборочно-сборочных работ при необходимости замены предусмотренных конструкцией элементов, подверженных интенсивному изнашиванию (втулки, вкладыши, гильзы цилиндров и др.);
- должны быть установлены нормативные ремонтные размеры для деталей, восстанавливаемых расточкой (блоки цилиндров, тормозные барабаны и др.);
- возможность своевременного обнаружения возникающих в процессе эксплуатации неисправностей встроенными контрольно-диагностическими приборами;
- детали, узлы, агрегаты, ресурс которых меньше межремонтного ресурса автомобиля, имеют конструкцию, обеспечивающую хороший доступ для контрольных и регулировочных работ, а при достижении предельного износа — для быстрой замены;
- наличие специальных приливов, пазов или резьбовых отверстий в конструкции деталей с прессовой или переходной посадкой, позволяющих при разборке применять простейший демонтажнй инструмент.

7.1.6. Резервирование элементов и систем

Надежность любой технической системы, состоящей из заданного числа элементов, зависит не только от надежности каждого из них, но и от способа их соединения. Анализ схемы соединения топливных фильтров двигателя (рис. 7.5, *а*), например, включающий фильтры грубой 1 и тонкой 2 очистки, показывает, что при засорении (отказе) любого из них нарушается подача топлива. Такое соединение конст-

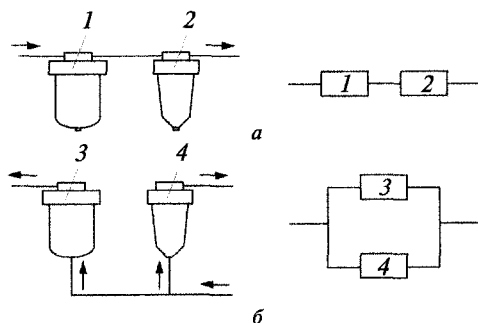


Рис. 7.5. Схемы соединения фильтров:

а — в системе питания; *б* — в системе смазки; 1 — топливный фильтр грубой очистки; 2 — топливный фильтр тонкой очистки; 3 — масляный фильтр грубой очистки; 4 — масляный фильтр тонкой очистки

руктивных элементов, когда отказ одного из них вызывает отказ системы в целом, называется последовательным.

Если вероятности безотказной работы каждого из фильтров в пределах заданной наработки равна P_1 и P_2 , то вероятность безотказной работы системы очистки топлива в целом определяется из выражения

$$P(t) = P_1 P_2. \quad (7.1)$$

Соединение масляных фильтров грубой 3 и тонкой 4 очистки системы смазки двигателя конструктивно выполнено по другой схеме (рис. 7.5, б). Фильтры работают независимо один от другого, и отказ одного из них не отражается на работе другого. Такое включение фильтров считается параллельным. Вероятность безотказной работы фильтров при такой системе соединения определяется по формуле

$$P(t) = 1 - (1 - P_3)(1 - P_4), \quad (7.2)$$

где P_3 , P_4 — вероятности безотказной работы фильтров тонкой и центробежной очистки, соответственно.

Анализ последней формулы показывает, что параллельное соединение элементов значительно повышает безотказную работу, следовательно, и надежность всей системы. Если, например, вероятность безотказной работы каждого фильтра принять равной $P = 0,9$, то вероятность безотказной работы системы очистки масла составит: $P(t) = 1 - (0,1)^2 = 0,99$, т. е. существенно выше каждого из входящих в нее фильтров. Поэтому параллельное включение элементов системы является основой весьма важного метода повышения надежности — резервирования.

В соответствии с ГОСТ 27.002—89 **резервирование** — это способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций. Если избыточность достигается использованием дополнительных элементов структуры объекта, то такое резервирование называют структурным.

При структурном резервировании конструктивные элементы машины могут быть основными и резервными. *Основным* называют элемент структуры объекта, необходимый для выполнения объектом заданных функций без использования резерва. *Резервный* элемент предназначен для обеспечения работоспособности объекта при отказе основного элемента.

В случае когда резервный элемент работает в том же режиме, что и основной, он считается *нагруженным*. Если резервный элемент работает с меньшей интенсивностью, чем основной, такой режим нагружения носит название *облегченного*. Резервный элемент при данном резервировании включается в режим работы основного элемента только в момент отказа последнего.

Резервирование может быть и *ненагруженным*, если резервный элемент не работает до тех пор, пока не отказал основной.

К резервированию прибегают, в основном, при разработке систем, состоящих из последовательно соединенных конструктивных элементов. При этом возможно несколько вариантов их резервирования.

Раздельное резервирование, обеспечивающее включение резервных элементов при отказе отдельных основных элементов системы.

Общее резервирование, при котором в случае отказа любого элемента основной системы включается резервная система, полностью заменяющая работу основной.

Использование структурной избыточности при резервировании ведет к усложнению системы, ее удорожанию. В связи с этим резервирование используют в системах, к которым предъявляются повышенные требования к надежности. В автомобильной технике это, в основном, рулевые и тормозные системы, отказы которых приводят к аварийным ситуациям. По статистике, отказы тормозных систем приводят к наиболее серьезным дорожно-транспортным происшествиям с тяжелыми последствиями, поэтому для повышения надежности используют различные варианты их резервирования.

Современные автомобили оборудуются запасными тормозными системами, которые включаются в работу при отказе рабочей систе-

мы. Для повышения безопасности в автомобилях с гидравлическим приводом рабочая тормозная система выполняется по схеме с двумя независимыми контурами, что позволяет сохранять работоспособность при отказе одного из них.

Схемы разнесения независимых контуров, включающих секции главного тормозного цилиндра и колесные цилиндры, могут быть различными. На рис. 7.6, *а* в один контур объединены первая секция главного тормозного цилиндра 1 и колесные цилиндры передних тормозов. Второй контур включает вторую секцию главного цилиндра 2 и цилиндры задних колес. На рис. 7.6, *б* показана диагональная схема разделения контуров, при которой один из них объединяет колесные цилиндры правого переднего и левого заднего тормозов, а второй — колесные цилиндры левого переднего и правого заднего тормозных механизмов.

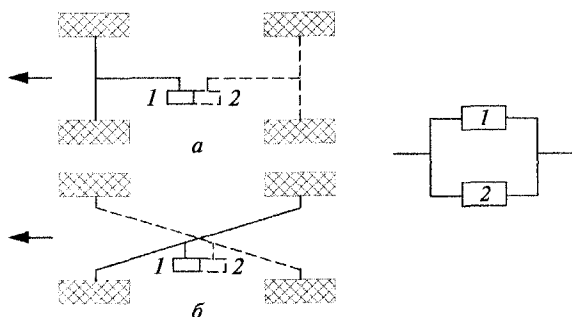


Рис. 7.6. Схемы тормозных систем с осевым (*а*) и диагональным (*б*) разделением контуров:

1 — контур, объединяющий первую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы колес; 2 — контур, объединяющий вторую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы колес

Такие структурные схемы соединений тормозной системы являются параллельными. Вероятность безотказной работы тормозной системы $P(t)$, выполненная по одной из таких схем, определяется по формуле (7.2).

Если принять условно вероятности безотказной работы обоих контуров равными $P_1 = P_2 = 0,9$, то

$$P(t) = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = 0,99.$$

Очевидный недостаток этих схем состоит в том, что отказ любого контура снижает эффективность торможения автомобиля, так как

тормозные механизмы одного из контуров не участвуют в торможении.

На рис. 7.7 показана схема тормозной системы с резервированием одного из контуров (передних дисковых тормозов). Дисковые тормоза при этом являются составной частью тормозного механизма, как основной тормозной системы, так и резервной.

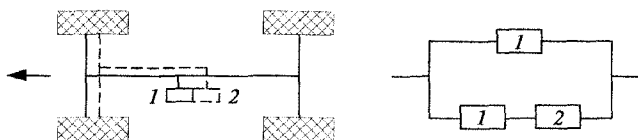


Рис. 7.7. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура: 1 — контур, объединяющий первую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы всех колес; 2 — контур, объединяющий вторую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы передних колес

Вероятность безотказной работы тормозной системы, выполненной по такой схеме раздельного резервирования, определяются из выражения:

$$P(t) = [1 - (1 - P_1)^2] P_2 = 0,891.$$

Более надежной является схема раздельного резервирования, в которой работоспособным всегда остается один из контуров, объединяющий цилиндры двух передних и одного заднего колес, т. е. в процессе торможения участвуют три тормозных механизма (рис. 7.8).

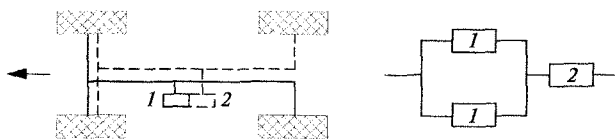


Рис. 7.8. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура и одного из цилиндров задних колес:

1 — контур, объединяющий первую секцию главного тормозного цилиндра, тормозные механизмы передних и заднего левого колес; 2 — контур, объединяющий вторую секцию главного тормозного цилиндра, тормозные механизмы передних и заднего правого колес

Вероятность безотказной работы тормозной системы с таким видом резервирования составляет:

$$P(t) = 1 - (1 - P_1) (1 - P_1 P_2) = 0,981.$$

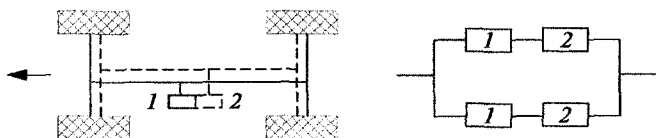


Рис. 7.9. Схема тормозной системы с общим резервированием:

1 — контур, объединяющий первую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы всех колес; 2 — контур, объединяющий вторую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы всех колес

На рис. 7.9 показана схема тормозной системы с общим резервированием, в которой любой из контуров осуществляет торможение всех колес, поэтому отказ одного из них не снижает тормозные качества автомобиля. В этом случае

$$P(t) = 1 - (1 - P_1 P_2)^2 = 0,964.$$

В любой схеме резервирования тормозной системы обязательным является наличие двух независимых главных тормозных цилиндров. Как правило, конструктивно они расположены последовательно в одном корпусе с приводом от педали одним штоком.

7.2. Обеспечение надежности машин при их производстве

В процессе изготовления машин тот уровень надежности, который был заложен конструкторами на стадии их проектирования, должен быть обеспечен. Однако среди причин отказов, возникающих в процессе эксплуатации, достаточно высокий процент занимают связанные с технологией изготовления изделий. Поэтому технологические методы обеспечения надежности имеют такое же важное значение, как конструктивные и эксплуатационные.

7.2.1. Требования к технологическим процессам изготовления изделий

Качество и надежность машин при их производстве непосредственно связаны с разработкой таких технологических процессов, которые должны обеспечить стабильность и точность изготовления деталей, сборки отдельных узлов, агрегатов и машины в целом.

Под *стабильностью технологического процесса* понимается его свойство сохранять показатели качества изготавливаемых изделий в требуемых пределах в течение определенного времени. Стабильность процессов определяется прежде всего технологической надежностью применяемого оборудования и обеспечением точности их изготовления.

Технологическая надежность оборудования характеризует его свойство сохранять в заданных пределах и во времени свои начальные характеристики, обеспечивающие требуемое качество выпускаемой продукции. Эти характеристики, определяющие показатели качества технологического оборудования (геометрическую точность, жесткость, устойчивость к вибрациям и т. д.), и обеспечивают в процессе изготовления необходимую точность обработки, качество поверхности и физические характеристики материала детали.

В процессе эксплуатации технологическое оборудование постепенно теряет свои начальные характеристики, что приводит к снижению качественных показателей технологического процесса, ухудшению механических характеристик материала деталей, уменьшению точности их изготовления, снижению надежности и качества изготавливаемой машины. Поэтому необходимым условием обеспечения технологической надежности оборудования является сохранение их высоких начальных характеристик в течение заданного периода работы.

Точность изготовления деталей, которая определяется точностью геометрических размеров рабочих поверхностей и их взаимного расположения, зависит, прежде всего, от уровня используемого оборудования и степени автоматизации производственных процессов. С повышением точности изготовления уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях, улучшаются условия их смазки, более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает долговечность автомобилей.

Значительное влияние на эксплуатационную надежность узлов и агрегатов машин оказывают различные отклонения от геометрической формы деталей. Например, с увеличением овальности и конусности гильз цилиндров двигателя ЯМЗ, которые характеризуют точность и стабильность технологического процесса обработки, существенно увеличивается интенсивность их изнашивания (рис. 7.10).

Кроме износостойкости, точность и качество изготовления деталей оказывает существенное влияние на выносливость деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, коррозионную стойкость, сопротивляемость динамическим нагрузкам.

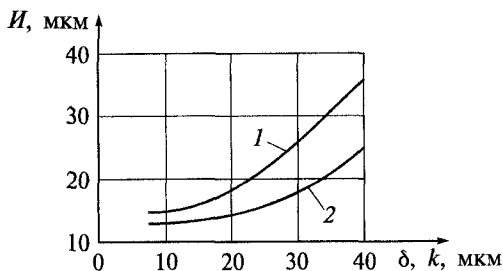


Рис. 7.10. Зависимости износа H от овальности δ (1) и конусности k (2) гильз цилиндров

Обеспечение высоких характеристик качества поверхностей деталей достигается применением на заключительных стадиях их изготовления таких методов обработки, как тонкое шлифование, хонингование, полирование, суперфиниширование, пластическое деформирование и др. Такие операции проводятся не только для уменьшения шероховатости, но и для удаления тонкого дефектного поверхностного слоя с низкими физико-механическими свойствами.

Обеспечение надежности машин при их изготовлении наряду со стабильностью технологических процессов предусматривает такие мероприятия, как:

- входной контроль качества поступающих для изготовления деталей материалов, полуфабрикатов и заготовок с целью своевременного выявления скрытых в них дефектов;
- применение при изготовлении деталей машин автоматизированных станков с программным управлением;
- максимальное снижение или полное исключение вредной технологической наследственности, возникающей в технологических процессах изготовления деталей машин;
- текущий и выходной контроль качества продукции в процессе ее изготовления;
- упрочнение рабочих поверхностей.

Входной контроль (выборочный или сплошной) необходимо проводить в связи с тем, что на заводы — изготовители машин поступают различные материалы, полуфабрикаты, а нередко и готовые сборочные единицы. Для обеспечения требуемого уровня надежности машин проводится проверка соответствия этой продукции установленным техническим требованиям. Контроль поступающих на предприятия материалов направлен на проверку механических характеристик

(твердости, прочности и др.), а также на выявление внутренних дефектов (трещин, засорений, пустот, рыхлот и т. д.).

Применение автоматизированных станков с программным управлением обеспечивает необходимую стабильность технологических процессов производства, высокое качество и точность изготовления деталей машин. Это позволяет повысить как надежность отдельных сборочных единиц, так и машины в целом.

Технологической наследственностью называется явление сохранения свойств объекта от предшествующих операций технологического процесса изготовления последующим. В процессе изготовления детали готовое изделие может наследовать как положительные, так и отрицательные свойства. В большинстве случаев технологическая наследственность оказывает отрицательное влияние на качество, поэтому стремятся максимально снизить или полностью исключить погрешности обработки с операции на операцию в процессе изготовления детали. Наиболее рациональным будет такой технологический процесс, где уже на начальных операциях изготовления полностью ликвидируются отрицательные свойства и не наследуются финишными операциями.

Возникновение дефектов в детали зависит от характера технологических процессов, которые используются в процессе ее изготовления. Источниками вредной технологической наследственности, например, при получении отливок являются дефекты в виде пор, раковин, трещин, нежелательных химических соединений изменение заданного химического состава.

При механической обработке поверхности детали могут передаваться такие виды вредной технологической наследственности, как остаточные напряжения, наклеп, изменение микро- и макрорельефа, концентраторы напряжения, изменение геометрии конструктивных элементов, внедрение посторонних частиц в поверхность трения и др.

В процессе изготовления детали полученные на начальной стадии дефекты на последующих стадиях изготовления частично или полностью устраняются. Существенным барьером на пути вредной технологической наследственности, например, при механической обработке поверхностей деталей, являются:

- чистовая обработка рабочих поверхностей деталей методом пластического деформирования;
- полирование с использованием синтетических алмазов;

- устранение поверхностных дефектов и подповерхностных повреждений методом термоциклической обработки;
- детонационное и плазменное напыление специальных покрытий на поверхность деталей;
- алмазное выглаживание и виброобкатывание поверхностей и др.

Контроль качества продукции в процессе ее изготовления является одним из основных методов обеспечения надежности машин. Под контролем понимается проверка соответствия продукции или процесса, от которого зависит ее качество, установленным техническим требованиям. Текущий контроль качества на всех или отдельных стадиях изготовления и сборки машин проводится по методикам, приведенным в программе обеспечения надежности изделия.

Для оценки качества продукции при массовом производстве в автомобилестроении широко используются статистические методы, когда о качестве изделий судят по результатам выборочного контроля. При таком контроле обосновывается достаточный объем выборки изделий в зависимости от объема серии и необходимой точности оценки качества.

Статистические методы контроля используются и для оценки параметров технологического процесса. Контролируются при этом характеристики качества оборудования, технологической оснастки и инструмента, проверяются методы их наладки и т. д. Оценку надежности технологического процесса проводят по результатам контроля точности его отдельных составляющих, а также параметрам качества изготавливаемых изделий.

7.2.2. Технологические методы упрочнения деталей

Для повышения качества деталей в современном машиностроении на финишных операциях изготовления используются различные методы упрочнения их поверхностей. К ним прежде всего относятся различные процессы термической и химико-термической обработки, упрочняющие технологии, основанные на пластическом деформировании поверхностей, а также нанесение износостойких и коррозионностойких покрытий.

Из механических способов упрочнения деталей наиболее перспективной является обработка рабочих поверхностей *пластическим деформированием*. Пластическое деформирование с успехом применя-

ется для деталей из самых разных материалов, используемых в автомобилестроении, — углеродистых и легированных сталей, чугунов, металлокерамики, алюминиевых и других сплавов. Преимущество способа заключается в том, что наряду с упрочняющим эффектом обработанные поверхности отличаются высокими показателями точности и шероховатости. Поэтому процесс пластического деформирования металлической поверхности по сути является процессом размерно-чистовой и упрочняющей обработки, сопровождаемой образованием новой поверхности со значительно лучшими эксплуатационными свойствами.

Пластическое деформирование металла сопровождается наклепом, которому подвергаются лишь тонкие поверхностные слои металла. Основная же часть металла обладает высокой вязкостью, поэтому упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием широко используется для повышения долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок и имеющих концентраторы напряжений. Предел выносливости деталей, обработанных пластическим деформированием поверхностных слоев, увеличивается в 2—2,5 раза, увеличивая тем самым в несколько раз их долговечность.

Повышение усталостной прочности при наклепе обусловлено изменением формы и размеров кристаллических зерен в поверхностном слое, возникновением в нем сжимающих напряжений. По абсолютной величине сжимающие остаточные напряжения при пластическом деформировании стали могут достигать $500\text{—}980\text{ МН/мм}^2$ в зависимости от материала и режима обработки.

Глубина наклепа при пластическом деформировании определяется назначением обработки. Она исчисляется десятными долями миллиметра при чистовой обработке с упрочнением, тогда как при упрочнении рабочей поверхности она достигает нескольких миллиметров.

Упрочнение металлических деталей пластическим деформированием находит все более широкое применение при изготовлении конструктивных элементов машин, том числе на поточных и автоматических линиях. В автомобилестроении используются такие процессы поверхностного пластического деформирования, как раскатывание и обкатывание многороликовыми инструментами, алмазное выравнивание наружных и внутренних поверхностей, вибрационное обкатывание, профильное накатывание и др. Такие детали, как пружины, рессоры, шестерни, шатуны и др. подвергают дробеструйной обра-

ботке (дробенаклепу). Коленчатые валы, оси, полуоси и поворотные цапфы весьма эффективно упрочняют обкаткой роликами и шариками. Рабочие поверхности втулок, верхних головок шатунов, гильз цилиндров, отверстий в корпусах коробок передач и задних мостов обрабатываются раскаткой и обкаткой шариковыми дорнами.

Термическая обработка деталей — один из самых эффективных и распространенных способов повышения прочности, износостойкости и долговечности деталей машин. Этот вид упрочнения применяется для самых различных металлов: сталей, чугунов, алюминиевых и других сплавов. В отличие от упрочнения пластическим деформированием при термической обработке, изменения геометрических размеров и формы детали не происходит. Основной целью термической обработки является целенаправленное изменение их механических и физико-химических свойств.

В автомобилестроении практически все ответственные, работающие под нагрузкой детали упрочняются термической обработкой. В основном на автомобильных заводах получили применение объемная закалка стальных деталей с последующим отпускком и поверхностная закалка стальных и чугунных деталей. В основе методов термического упрочнения является закалка, которая заключается в нагреве детали до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении.

Объемная закалка повышает общую прочность детали, так как структура материала при этом изменяется по всему ее объему одинаково. Такой вид упрочнения включает операции заковки и последующего низкого, среднего или высокого отпуска, который придает материалу необходимые свойства, в том числе и твердость. Чем ниже температура отпуска, тем выше твердость стальных деталей (рис. 7.11).

Объемная закалка не всегда обеспечивает получение требуемых свойств деталей. Наиболее нагруженным при эксплуатации является поверхностный слой, который из-за наличия в нем остаточных растягивающих напряжений обладает более низкими свойствами, чем свойства материала внутри детали. Тем не менее, до 30 % общего объема упрочняемых деталей автомобилей подвергают объемной закалке.

Поверхностная термическая обработка применяется для упрочнения деталей, которые должны обладать высокой твердостью и износостойкостью рабочих поверхностей. В отличие от объемной заковки нагреву при таком виде упрочнения подвергается только рабочая поверхность детали. Нагрев поверхностного слоя при термической обра-

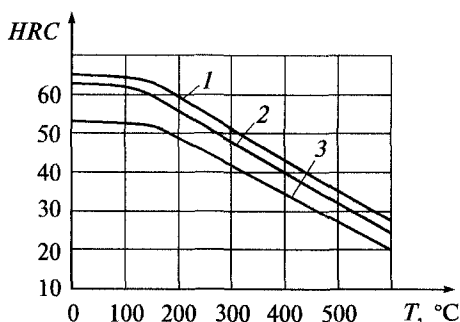


Рис. 7.11. Зависимость твердости материала стальных деталей с различным содержанием углерода C от температуры отпуска:
 1 — $C = 0,8\%$; 2 — $C = 0,6\%$; 3 — $C = 0,35\%$

ботке может осуществляться различными способами: токами высокой частоты (ТВЧ), высококонцентрированными источниками энергии с использованием лазерного или электронного излучения. В автомобилестроении наиболее широкое применение получила закалка деталей с нагревом ТВЧ. Этот способ упрочнения характеризуется высокой производительностью и легко встраивается в общие технологические линии изготовления деталей. Существенно улучшаются эксплуатационные свойства закаленных таким способом деталей: поверхностные слои в результате обработки приобретают высокую твердость (54—62 HRC), а сердцевина остается достаточно вязкой (30—45 HRC). Это обеспечивает существенное повышение усталостной и контактно-усталостной прочности, что очень важно для деталей, работающих в условиях знакопеременных динамических нагрузок.

Химико-термическая обработка деталей позволяет изменять химический состав их поверхностных слоев, а также структуру и свойства металла. Наибольшее распространение для упрочнения деталей получили такие методы химико-термической обработки, как цементация (насыщение углеродом), азотирование (насыщение азотом) и нитроцементация (совместное насыщение углеродом и азотом). Кроме того, находят применение также алитирование (насыщение алюминием), борирование (насыщение бором), цинкование (насыщение цинком) и др.

Методы упрочнения деталей химико-термической обработкой эффективны лишь в том случае, когда они проводятся в сочетании с объемной закалкой. Например, технологические процессы цементации

ции и нитроцементации включают выполнение следующих этапов: нагрев, химическое воздействие (насыщение), объемная закалка и низкотемпературный отпуск. *Цементации и нитроцементации* подвергаются самые разные детали автомобилей, но наибольшее применение они находят при упрочнении зубчатых колес, к прочности, износостойкости, усталостной и контактной выносливости которых предъявляются повышенные требования.

Азотированию подвергаются детали, к которым предъявляются повышенные требования к износостойкости, работающие в условиях динамических нагрузок, высоких температур и агрессивных сред (коленчатые валы, впускные и выпускные клапаны, гильзы цилиндров и др.). В отличие от цементации и нитроцементации технологический процесс азотирования начинается с закалки и высокотемпературного отпуска, а затем уже проводится азотирование.

В автомобилестроении широко применяются также различные методы нанесения на поверхности деталей *специальных покрытий*. В отличие от химико-термической обработки, при которой происходит диффузионное насыщение поверхности детали, при нанесении специального покрытия диффузионного слоя нет, поэтому имеется четкая граница между ним и основным металлом.

В зависимости от назначения специальные покрытия подразделяются на антифрикционные, антикоррозионные, износостойкие, жаростойкие и др. Для их создания используются металлические (алюминий, медь, цинк, сталь), керамические (карбиды, нитриды, оксиды, бориды), композиционные и полимерные материалы.

Эксплуатационные свойства покрытий зависят от метода их нанесения на поверхность детали. На предприятиях автомобильной промышленности наиболее широкое распространение получили следующие методы создания покрытий: плазменное, детонационное и вакуумное ионно-плазменное напыления поверхностей различными материалами, а также электроискровая обработка твердыми сплавами.

При *плазменном напылении* используемый для напыления материал расплавляется в плазменной струе газа (аргона, водорода, азота и др.) и образует на поверхности детали покрытие с требуемыми эксплуатационными свойствами. В качестве примера можно привести плазменное напыление шаровых пальцев, поршневых колец, вилок переключения коробок передач, торцов стержней клапанов, распределительных валов и целого ряда других деталей автомобилей. Изно-

состояйкость обработанных этим способом деталей повышается в несколько раз.

Нанесение покрытий *детонационным способом* предусматривает сочетание температурного (газоплазменного) и импульсного (взрыв-

Таблица 7.2. Методы и основные результаты упрочнения деталей автомобилей

Метод упрочнения	Примеры применения и результаты
Пластическое деформирование деталей, работающих при циклических нагрузках	Клапаны, штоки и цилиндры амортизаторов, шаровые пальцы, коленчатые и распределительные валы. Предел выносливости повышается в 2—2,5 раза за счет образования в поверхностном слое детали остаточных сжимающих напряжений
Объемная закалка и низкотемпературный отпуск	Шарики, ролики, кольца подшипников качения, клапаны и седла клапанов, валики топливных насосов, плунжеры. Обеспечиваются высокая твердость поверхностного слоя (HRC 59—63), износостойкость и контактная прочность
Объемная закалка и среднетемпературный отпуск	Рессоры, пружины разной формы, звездочки, пружинные шайбы, другие упругие элементы. Повышаются упругость и сопротивление хрупкому разрушению
Объемная закалка и высокотемпературный отпуск	Валы, оси, зубчатые колеса, штоки, шатуны, роторы. Повышаются изгибная и контактная прочность и выносливость, сопротивляемость ударным нагрузкам
Поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты	Валы, детали подшипников качения, зубчатые колеса, шлицевые валы, крестовины карданного вала. В 2,5—3 раза повышается износостойкость, в 1,5—2 раза — усталостная и контактно-усталостная прочность
Химико-термическая обработка поверхностей (цементация, азотирование, нитроцементация)	Зубчатые колеса, впускные и выпускные клапаны, гильзы цилиндров, коленчатые валы. Повышаются твердость, износостойкость, контактная и усталостная выносливость, в 1,5—2 раза увеличивается ресурс деталей
Нанесение специальных покрытий на рабочие поверхности плазменным, детонационным и другими способами	Шаровые пальцы, поршневые кольца, детали топливной аппаратуры, коробок передач, распределительные и коленчатые валы. В 1,5—2 раза повышается ресурс деталей, подверженных изнашиванию и контактными нагрузками

ного) воздействия на частицы наносимого на поверхность материала. В результате детонации создаваемой газовой смеси под действием импульсов на поверхности детали образуется плотное покрытие, обеспечивающее требуемые эксплуатационные свойства. Детонационный способ нанесения покрытий с использованием оксидов алюминия, вольфрама, хрома, титана и других материалов применяется для упрочнения различных деталей автомобилей.

Вакуумное ионно-плазменное напыление является весьма перспективным способом нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности деталей. На автомобильных предприятиях такие покрытия наносятся на прецизионные детали топливной аппаратуры, поршневые кольца, лопасти ротора насоса гидроусилителя рулевого управления и др.

Метод электроискровой обработки применяется для локального упрочнения рабочих поверхностей деталей и основан на использовании эффекта электрической эрозии. В процессе такой обработки на специальных установках материал электрода (твердые сплавы, композиты, бронза, молибден и др.) под воздействием импульсных разрядов переносится на поверхность детали. Электроискровая обработка широко используется для упрочнения поверхностей коленчатых и распределительных валов, деталей коробок передач и топливной аппаратуры.

В табл. 7.2 приведены перспективные методы упрочнения деталей автомобилей.

Вопросы для самопроверки

1. Какие стадии включает процесс проектирования машины?
2. Перечислите основные конструктивные методы обеспечения надежности машин.
3. Приведите основные принципы компоновочного решения машины.
4. Какие требования предъявляются к материалам деталей, используемым в парах трения?
5. Перечислите основные антифрикционные материалы, применяемые в автостроении?
6. Какие требования обеспечения ремонтпригодности предъявляются к современным автомобилям?
7. С какой целью используют резервирование элементов и систем автомобиля?

8. Перечислите наиболее важные технологические мероприятия повышения надежности автотранспортных средств.
9. Какие требования предъявляются к технологическим процессам изготовления деталей?
10. Какие методы упрочнения рабочих поверхностей деталей применяются в современном автомобилестроении?
11. Назовите преимущества механической обработки деталей пластическим деформированием.
12. В чем заключается различие между объемной и поверхностной закалкой деталей?
13. Объясните различие между термической и химико-термической обработкой деталей.
14. Какие методы упрочнения деталей химико-термической обработкой применяются в автомобилестроении?
15. В чем состоит сущность упрочнения деталей нанесением специальных покрытий?
16. Какие способы нанесения покрытий используются для упрочнения рабочих поверхностей деталей?

Глава 8

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Эффективность использования машин по назначению в существенной степени определяется их надежностью, поэтому задача обеспечения надежности занимает важное место среди общих задач эксплуатации.

Эксплуатация автомобилей, например, является более длительным, трудоемким и дорогим процессом, чем их производство. Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт за весь период эксплуатации по разным оценкам в 5—10 раз превышают стоимость автомобиля. Поэтому поддержание и восстановление надежности автомобилей в эксплуатации является важнейшей составной частью общей системы обеспечения надежности, предыдущими этапами которой являются проектирование и производство, где закладываются и обеспечиваются исходные показатели надежности.

8.1. Факторы, влияющие на надежность машин в эксплуатации

На фактические показатели надежности транспортных машин, в том числе и автомобилей, существенное влияние оказывают условия и методы эксплуатации, принятая система технического обслуживания и ремонта, квалификация персонала и др. (табл. 8.1).

Приведенные в таблице факторы с некоторой условностью можно подразделить на три группы: неуправляемые, частично управляемые и управляемые.

Неуправляемыми, но оказывающими большое влияние на надежность автомобилей в эксплуатации, являются факторы *внешней среды*

Таблица 8.1. Факторы, влияющие на надежность автомобилей в эксплуатации

Условия эксплуатации	Система ТО и ремонта	Персонал	Производственно-техническая база
Тип и состояние дорожного покрытия	Методы организации ТО и ремонта	Квалификация персонала	Обеспеченность площадями
Природно-климатические условия	Использование средств диагностики	Условия и организация труда	Оснащенность технологическим оборудованием
Эксплуатационные режимы работы автомобилей	Качество выполнения ТО и ремонта	Социально-бытовые условия	Уровень механизации процессов ТО и ремонта
Агрессивность окружающей среды	Материально-техническое обеспечение	Повышение квалификации персонала	Способ хранения автомобилей
Качество эксплуатационных материалов	Совершенствование системы управления производством	Стимулирование качества работы	Развитие специализации и кооперации ТО и ремонта

(состояние и тип дорожного покрытия, интенсивность движения, природно-климатические условия, агрессивность окружающей среды). Совокупное влияние этих факторов на надежность учитывается при разработке нормативов технической эксплуатации автомобилей (периодичностей технического обслуживания и трудоемкостей их выполнения) с помощью соответствующих корректирующих коэффициентов.

Для V категории условий эксплуатации, например, в соответствии с отраслевыми нормативами технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта периодичность ТО и нормативный ресурс автотранспортных средств снижается на 40 %, удельная трудоемкость текущего ремонта увеличивается в 1,6 раза, по сравнению с I категорией эксплуатации. При работе автомобилей в таких тяжелых условиях резко возрастают поток отказов и расход запасных частей.

Существенное влияние на безотказность и долговечность автомобилей оказывают *природно-климатические условия*. В районах холодного и очень холодного климата на 20—30 % снижаются периодич-

ность ТО и ресурсный пробег автомобилей, а удельная трудоемкость ремонтных работ возрастает в 1,2—1,3 раза.

Изменение категории условий эксплуатации, климатического района оказывает существенное влияние на техническое состояние коробок передач, задних мостов, двигателей, карданных передач, подвесок, сцеплений и других узлов ходовой части автомобиля.

К частично управляемым факторам, оказывающим влияние на надежность, относятся эксплуатационные режимы работы автомобилей, качество эксплуатационных материалов и квалификация водителей. Зависимость интенсивности изменения технического состояния автомобилей от эксплуатационных режимов их работы была рассмотрена в параграфе 4.7.

Большое влияние на интенсивность изнашивания конструктивных элементов автомобиля, и прежде всего двигателя оказывает качество используемых эксплуатационных материалов — топлива, масла, охлаждающей жидкости.

В качестве основных видов топлива для автомобилей применяют **бензин и дизельное топливо**. Используемые в современных автомобилях топлива влияют не только на динамику процесса сгорания, но и на условия работы деталей кривошипно-шатунного механизма и других узлов двигателя. Они должны обладать минимальной интенсивностью нагарообразования, отложений, отсутствием коррозионной агрессивности и коррозионных повреждений деталей, соприкасающихся с продуктами сгорания топлива.

Для обеспечения этих требований бензин должен обладать химической стабильностью, иметь высокие карбюраторные, антидетонационные и антикоррозионные свойства, которые характеризуют его эксплуатационные качества.

Требования, предъявляемые к дизельному топливу, в основном аналогичны требованиям к бензину. Кроме того, учитывая особенности рабочего процесса дизельных двигателей, топливо них должно обеспечивать его хорошее распыление и смесеобразование, легкое воспламенение и плавное сгорание, гарантированное поступление в цилиндры при различных температурах окружающей среды.

Моторные масла, кроме разделения трущихся поверхностей и уменьшения сил трения, выполняют также функции отвода тепла в сопряжениях. В современных высокофорсированных автомобильных двигателях масляная пленка подвергается воздействию высоких температур и давлений, что сопряжено с постоянной опасностью ее по-

вреждения, ускорением процессов окисления, старением масла, образованием нагара и лаков на деталях цилиндропоршневой группы.

Наиболее интенсивно процесс старения масла протекает в зоне поршневых колец двигателя, где тонкая пленка масла находится под влиянием высокой температуры и концентрации продуктов сгорания топлива.

За последние годы качество смазочных материалов значительно улучшилось за счет целого пакета сложных и совершенных присадок (антифрикционных, антиокислительных, вязкостных, моющих и т. д.), которые существенно снижают интенсивность изнашивания, защищают от отложений и коррозии, создают нормальные условия работы в экстремальных режимах.

В настоящее время все более широкое применение находят синтетические моторные масла, которые обладают низкой температурой застывания, высокой термостабильностью и прокачиваемостью, хорошими смазочными и вязкостно-температурными свойствами, обеспечивающими легкий запуск холодного двигателя, стойкостью к окислению. Использование таких масел существенно снижает интенсивность изнашивания конструктивных элементов двигателя и повышает его ресурс.

На рис. 8.1 показаны результаты испытаний изнашивания хромированного поршневого кольца до предельного состояния на минеральном и синтетическом маслах.

Стадия приработки кольца характеризуется высокой скоростью изнашивания, которая постепенно снижается и достигает по оконча-

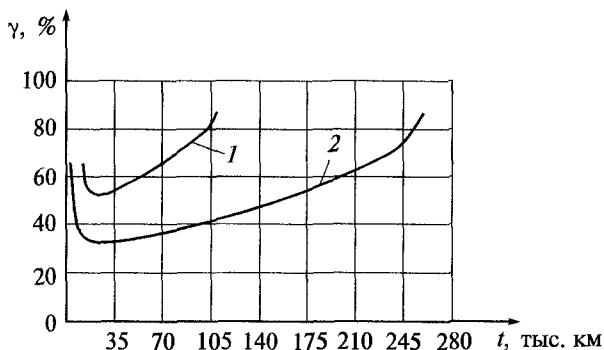


Рис. 8.1. Кривые изнашивания хромированного поршневого кольца: 1 — на минеральном масле; 2 — на синтетическом масле; γ — относительный износ

нию процесса приработки минимального значения. При этом, как видно из рисунка, период приработки кольца на синтетическом масле заканчивается раньше (15 тыс. км), чем на минеральном (20 тыс. км), а его относительный износ за этот период значительно меньше.

На стадии установившегося (нормального) изнашивания, когда рабочие поверхности колец окончательно приработались, процесс протекает с постоянной скоростью до определенной наработки (на минеральном масле до 100 тыс. км, на синтетическом — до 250 тыс. км). При достижении этих наработок скорость изнашивания начинает резко расти, и процесс переходит в стадию аварийного износа, т. е. кольцо достигло предельного состояния. Таким образом, при работе поршневого кольца на синтетическом масле его ресурс в 2,5 раза выше, чем при работе на минеральном масле.

В процессе эксплуатации под воздействием внешней среды эксплуатационные свойства моторных масел ухудшаются. Ухудшение качества масел происходит вследствие его загрязнения продуктами изнашивания деталей, попадания в них пыли, фракций топлива, воды, а также в результате срабатывания присадок. Под воздействием кислорода воздуха и воды, попадающей в систему смазки двигателя, происходит процесс окисления масла, скорость которого возрастает с увеличением наработки.

При окислении в масле образуются различные смолы, кислоты, нерастворимые примеси, которые не улавливаются фильтрами очистки и увеличивают не только кислотное число, но и кинематическую вязкость. Процессу окисления масел с образованием нерастворимых примесей способствуют высокие рабочие температуры смазываемых деталей и проникающие в масляный поддон картерные газы.

С увеличением наработки происходит срабатывание присадок, снижается их концентрация, что ухудшает начальные эксплуатационные свойства масел. Это приводит к росту интенсивности изнашивания трущихся поверхностей деталей, возникновению коррозионных повреждений, снижению ресурсов узлов и механизмов. Содержание присадок в масле оценивается щелочным числом, снижение которого ниже допустимых значений может служить причиной замены масла, так как оно утратило способность выполнять свои функции на должном уровне.

В процессе работы двигателя наряду с ухудшением первоначальных свойств масла уменьшается и его количество. Общий расход масла складывается, главным образом, вследствие угара в камере сгорания и

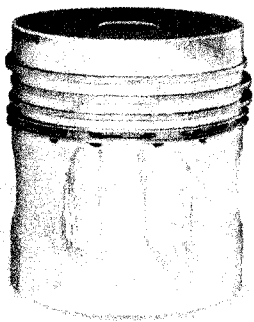


Рис. 8.2. Задирь на юбке поршня из алюминиевого сплава при работе с недостаточным количеством масла

из-за появления утечек через сальники и другие уплотнения. Недостаточное количество масла в системе смазки двигателя является одной из причин преждевременного износа деталей кривошипно-шатунного механизма (поршней, поршневых колец, коленчатых валов, вкладышей подшипников, цилиндров и др.).

При недостаточном количестве масла в двигателе масляная пленка в зоне трения поверхностей поршня, поршневых колец и цилиндра в отдельных местах разрушается. Вследствие этого на юбке поршня возникают узкоограниченные задирь, распространяющиеся до зоны ко-

лец (рис. 8.2). Поверхности задиров светлые и имеют металлический блеск. При дальнейшей эксплуатации двигателя с недостаточной смазкой масляная пленка может разрушиться полностью, в результате чего область задиров увеличивается, а их поверхности приобретают темный оттенок.

Для того чтобы избежать возникновения таких повреждений рекомендуется регулярная проверка уровня масла в двигателе и доливка в случае необходимости. Нормальный расход масла (без учета нарушений герметичности) в зависимости от мощности двигателя колеблется в пределах от 0,2 до 1,5 г/кВтч.

С ростом эксплуатационных свойств масла растет степень защиты двигателя от изнашивания, поэтому после гарантийного пробега для снижения интенсивности изнашивания деталей можно использовать масла с более высокими эксплуатационными свойствами. И, наоборот, не рекомендуется замена высококачественных масел с высокими эксплуатационными свойствами на менее качественные (например, синтетических на минеральные).

Существенное влияние на реализацию надежности автомобиля в эксплуатации оказывает квалификация водителя. Квалифицированные водители обеспечивают более благоприятные условия работы агрегатов и механизмов при движении автомобиля и, как следствие, более надежную его работу (табл. 8.2).

Как видно из приведенной таблицы, повышение квалификации водителей существенно улучшает показатели, характеризующие экс-

Таблица 8.2. Влияние квалификации водителей на показатели работы автомобиля

Показатель	Среднее значение	Квалификация		В/А, %
		высокая, А	невысокая, В	
Число торможений на 1 км пробега	1,9	1,4	2,4	171,4
Тормозной путь в процентах общего пробега автомобиля	1,15	1,0	1,3	130,0
Число включений сцепления на 1 км	2,65	2,1	3,2	152,4
Наработка на отказ, %	—	100	75	75,0
Ресурс основных агрегатов в процентах нормативного значения	—	131	76	58,0
Годовые затраты на ТО и ремонт, %	100	75	115	153,3

платационную надежность автомобиля. Совершенствование системы материального и морального стимулирования, а также улучшение социально-бытовых условий работы водителей могут существенно улучшить качество вождения и повысить эксплуатационную надежность подвижного состава.

Управляемые факторы, к которым относятся принятая на предприятии система ТО и ремонта, ее производственно-техническая база и квалификация производственно-технического персонала, оказывают наибольшее влияние на обеспечение надежности автомобилей в эксплуатации.

Эффективность системы ТО и ремонта определяется степенью ее приспособленности к выполнению функций по управлению периодичностью обслуживания, объемами работ ТО и ремонта, затратами на их проведение, ресурсом автомобиля. Совокупность используемых при этом средств ТО и ремонта, включающий здания, сооружения, оборудование, оснастку и инструмент, носит название производственно-технической базы (ПТБ) автотранспортного предприятия.

Вклад ПТБ в эффективность технической эксплуатации автомобилей достаточно высокий и оценивается, по данным ряда исследований, от 18 до 21 % в зависимости от уровня ее развития. Уровень ПТБ автотранспортного предприятия определяется обеспеченностью производственными и складскими помещениями, рабочими постами и

поточными линиями, степенью механизации производственных процессов, специализацией и кооперацией АТП при выполнении сложных и трудоемких видов ТО и ТР.

8.2. Система технического обслуживания и ремонта машин

Основной задачей технической эксплуатации является поддержание работоспособного состояния машин на уровне, достаточном для осуществления ими заданных функций.

На автомобильном транспорте для решения этой задачи создана и функционирует **планово-предупредительная система технического обслуживания (ТО) и ремонта**, которая представляет собой совокупность средств, нормативно-технической документации и исполнителей, необходимых для обеспечения работоспособного состояния подвижного состава. В соответствии с ГОСТ 28.001—83 основной целью системы является управление техническим состоянием автотранспортных средств в течение всего срока службы или ресурса до списания, позволяющее обеспечить заданный уровень их технической готовности к использованию по назначению при минимальных затратах на ТО и ремонт.

Высокая эксплуатационная надежность автомобилей, как главная цель, стоящая перед технической службой автотранспортных предприятий, обеспечивается решением следующих основных задач:

- предупреждением (профилактикой) отказов и неисправностей;
- снижением темпа изнашивания и отдалением момента достижения объектом предельного состояния;
- обеспечением требуемого уровня вероятности безотказной работы.

Снижение темпа изнашивания увеличивает наработки конструктивных элементов на отказ, повышает показатели безотказности, снижает простои автомобилей в ремонтах, в том числе и в периоды между обслуживаниями.

8.2.1. Стратегии технического обслуживания и ремонта

Эффективность технической эксплуатации во многом зависит от принятой стратегии технического обслуживания и ремонта. В соответствии с ГОСТ 24212—80 под стратегией технического обслужива-

ния и ремонта понимается система правил управления техническим состоянием изделия в процессе ТО (ремонта).

На автомобильном транспорте возможны две стратегии управления ТО и ремонтом автотранспортных средств:

I — техническое обслуживание по наработке, в соответствии с которой перечень и периодичность выполнения операций определяются плановыми значениями пробегов автомобиля;

II — техническое обслуживание и ремонт по состоянию, при которой перечень и периодичность выполнения технических воздействий, направленных на обеспечение работоспособности автомобилей, назначаются в соответствии с их фактическим техническим состоянием.

При плановом проведении технического обслуживания по первой стратегии для всех изделий через определенный пробег или интервал времени выполняется регламентированный объем профилактических работ, а параметры их технического состояния доводятся до номинальных или близких к ним значений. При назначении периодичности проведения этих работ исходят из того, чтобы предупредить возможность возникновения отказа машины в процессе выполнения ею заданных функций.

Очевидный недостаток системы ТО и ремонта по наработке заключается в том, что в реальных условиях эксплуатации неизбежна вариация технического состояния изделий. Значительная их часть к моменту проведения регламентных работ по ТО или ремонту не нуждаются в них, так как имеют потенциальную наработку на отказ (остаточный ресурс), значительно превышающую плановую периодичность выполнения технических воздействий. Для таких изделий проведение ТО и ремонтов по плановой наработке является преждевременным и неоправданным, так как не учитывает их фактическое состояние и не позволяет в полной мере использовать заложенный в них ресурс.

Проведение ненужных операций ТО и ремонтных воздействий по наработке существенно снижает эффективность технической эксплуатации машин и не всегда обеспечивает необходимый уровень их надежности. Вследствие разных условий эксплуатации, режимов работы, квалификации водителей, качества и точности изготовления машин и других факторов интенсивность изменения их технического состояния является величиной случайной (рис. 8.3). Для множества однотипных изделий изменение параметра Y , определяющего их тех-

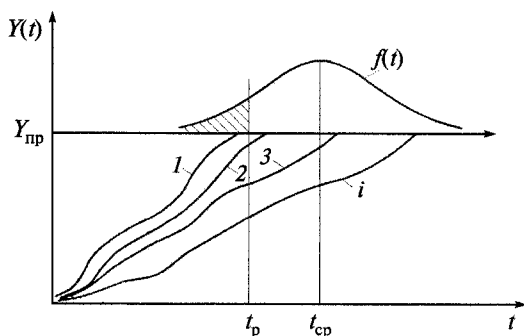


Рис. 8.3. Схема формирования отказа изделия

ническое состояние, носит случайный характер и характеризуется дифференциальной функцией распределения $f(t)$.

Отказ изделия происходит в момент пересечения реализации $Y_i(t)$ уровня, соответствующего предельному значению параметра $Y_{пр}$. Под влиянием неблагоприятных условий внешней среды отказ какой-то части изделий может произойти до проведения плановых ремонтных воздействий (реализация 1). Остаточный ресурс большей части изделий остается нереализованным.

Таким образом, применение стратегии проведения ремонта по назначенной наработке приводит к существенному недоиспользованию индивидуальных ресурсов большинства изделий и может быть рекомендовано только при предъявлении к ним высоких требований по надежности.

Стратегия технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию позволяет если не избежать в полном объеме перечисленные недостатки, то значительно снизить их. Эта стратегия, несмотря на соблюдение принципа плановости проведения ТО и ремонта, существенно отличается от выполнения этих операций по наработке.

С заданной периодичностью здесь выполняются только контрольно-диагностические и некоторые виды регламентных профилактических работ (замена масел, рабочих жидкостей, фильтров и др.). Регулировочные, разборочно-сборочные, ремонтные работы выполняются только по результатам диагностирования и контроля. Проведение этих работ в соответствии с действительной потребностью в них позволяет исключить ненужные операции обслуживания и ремонта и полнее использовать ресурс каждого конкретного изделия.

Тем самым существенно снижаются затраты на обслуживание и ремонт, а также простой машин по техническим причинам за счет достоверной постановки диагноза об их фактическом состоянии.

Предварительное диагностирование машин перед проведением текущего ремонта позволяет выявить скрытые и нечетко выраженные отказы и неисправности и своевременно предупредить их возникновение. Определение фактических объемов работ технического обслуживания автомобилей на базе диагностической информации сокращает трудоемкость их проведения на 15—20 %.

Таким образом, стратегия технического обслуживания и ремонта по состоянию является более рациональной и эффективной по сравнению со стратегией ТО и ремонта по наработке. Ее практическая реализация требует научного обоснования периодичностей контрольно-диагностических операций, алгоритмов их проведения, правил формирования объемов необходимых технических воздействий, технологий их выполнения.

Работоспособное состояние подвижного состава автомобильного транспорта обеспечивается выполнением целого ряда организационных, технических и технологических мероприятий при производстве ежедневного (ЕО), первого (ТО-1), второго (ТО-2), сезонного (СО) обслуживаний и ремонте.

8.2.2. Техническое обслуживание автомобилей

Техническое обслуживание представляет собой комплекс работ, направленных на поддержание объекта в работоспособном состоянии в процессе его эксплуатации и обеспечение его надежной работы. Это достигается, во-первых, предупреждением возникновения отказов за счет профилактического контроля и доведения параметров технического состояния автомобиля до номинальных или близких к ним значений; во-вторых, предупреждением отказов в результате уменьшения интенсивности изменения параметров технического состояния, снижением темпа изнашивания сопряженных деталей.

Техническое обслуживание является профилактическим мероприятием, проводимым принудительно, как правило, в плановом порядке, и включает в себя комплекс контрольно-диагностических, крепежных, регулировочных, смазочных, заправочных и других работ. Характерным для этих работ является их сравнительно невысо-

кая трудоемкость, а также то, что они выполняются в основном без разборки агрегатов, узлов и деталей. Но если техническое состояние отдельных узлов определить при ТО не удастся, допускается их снятие с автомобиля для проверки на специальных стендах и приборах.

Зависимость технического состояния автомобилей от большого количества факторов обуславливает необходимость обоснования рациональных режимов их технического обслуживания, под которыми понимаются периодичности ТО, объемы работ и трудоемкости их выполнения.

Принципы обоснования периодичности выполнения работ ТО можно рассмотреть с помощью модели возникновения неисправностей и отказов в процессе эксплуатации машин (рис. 8.4). Как уже отмечалось, основной задачей технического обслуживания является предотвращение возникновения отказа. Поэтому целесообразно устанавливать его проведение на наработке t_2 , когда возникшая неисправность не переросла в отказ и появился признак, определяющий характер профилактических работ.

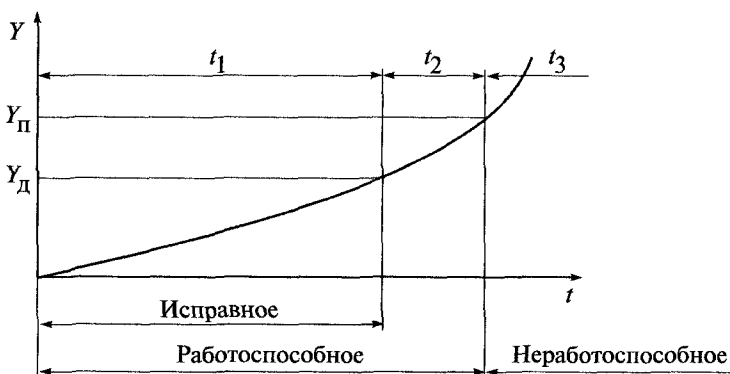


Рис. 8.4. Схема развития постепенного отказа:

t_1 — наработка до возникновения неисправности; t_2 — наработка, в течение которой неисправность перерастает в отказ; t_3 — наработка, в течение которой отказ приводит к наступлению предельного состояния

В случае назначения проведения обслуживания на наработке t_1 , когда нет неисправности и соответствующего признака его проявления, выполнение профилактических мероприятий носит неопределенный характер и является преждевременным. Назначение профилактических работ ТО на наработке t_3 , когда отказ уже возник, не

имеет никакого смысла, так как для восстановления работоспособного состояния изделия необходим ремонт.

Периодичность ТО на автотранспортных предприятиях в зависимости от конкретных условий может определяться следующими методами:

- по «Положению о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта» с учетом коэффициентов корреляции k_i ;
- по допустимому уровню безотказности;
- по закономерности изменения параметра технического состояния и его допустимому значению;
- по минимуму суммарных удельных затрат на ТО и ремонт (технико-экономический метод);
- по диагностической информации о техническом состоянии.

Нормативные периодичности ТО автомобилей t_i^H установлены Положением для I категории условий эксплуатации и умеренного климатического района. В случае когда условия эксплуатации подвижного состава отличаются от указанных выше, нормативные значения периодичностей корректируются с помощью коэффициентов, учитывающих категорию условий эксплуатации k_1 и климатический район k_2 :

$$t_i = t_i^H \cdot k_1 \cdot k_2, \quad (8.1)$$

Очевидным недостатком метода является то, что периодичность ТО назначается по наработке автомобилей без учета их фактического состояния.

Рациональная периодичность ТО по **допустимому уровню безотказности** определяется из условия, что вероятность безотказной работы изделия не может быть ниже заданной величины R_d , называемой риском:

$$P_d(t_i \geq t_0) \geq R_d = \gamma, \quad (8.2)$$

где P_d — допустимая вероятность безотказной работы; t_i — наработка на отказ; t_0 — периодичность ТО; γ — заданная вероятность безотказной работы.

Периодичность ТО в соответствии с этим методом принимают обычно равной значению гамма-процентного ресурса, т. е. $t_0 = t_\gamma$ (рис. 8.5). Такая периодичность обеспечивает высокий уровень безотказной работы автомобиля на наработке между очередными профилактическими обслуживаниями ($P_d = 0,95...0,98$ — для узлов и систем,

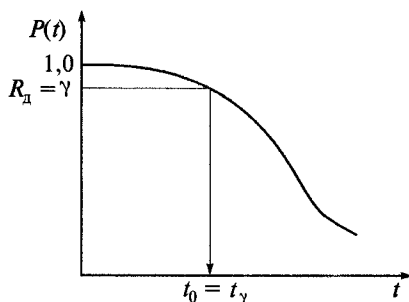


Рис. 8.5. Определение периодичности ТО по допустимому уровню безотказности

непосредственно влияющих на безопасность движения, и $P_0 = 0,85 \dots 0,90$ — для прочих элементов).

Найденная таким методом периодичность значительно меньше средней наработки на отказ t_{cp} и связана с ней следующей зависимостью

$$t_0 = \beta \cdot t_{cp}, \quad (8.3)$$

где β — коэффициент рациональной периодичности, учитывающий величину и характер вариации наработки на отказ, а также принятую допустимую вероятность безотказной работы R_d .

Несмотря на простоту использования, метод обладает существенным недостатком. При значительных вариациях изменения технического состояния автомобилей он обладает невысокой эффективностью, так как для значительной части подвижного состава при такой периодичности ТО проведение профилактических работ является преждевременным.

Метод определения периодичности ТО по **закономерности изменения параметра технического состояния и его допустимому значению** является статически-аналитическим.

Изменение любого параметра технического состояния у группы автомобилей в зависимости от множества факторов, оказывающих влияние на интенсивность этого процесса α , происходит в широких пределах (рис. 8.6, кривые 1—7).

По статистическим реализациям параметра Y можно определить среднее значение наработки изделий t_{cp} до достижения ими допустимого значения Y_d . На схеме этому значению наработки соответствуют реализация 4 и средняя интенсивность изменения параметра α_{cp} .

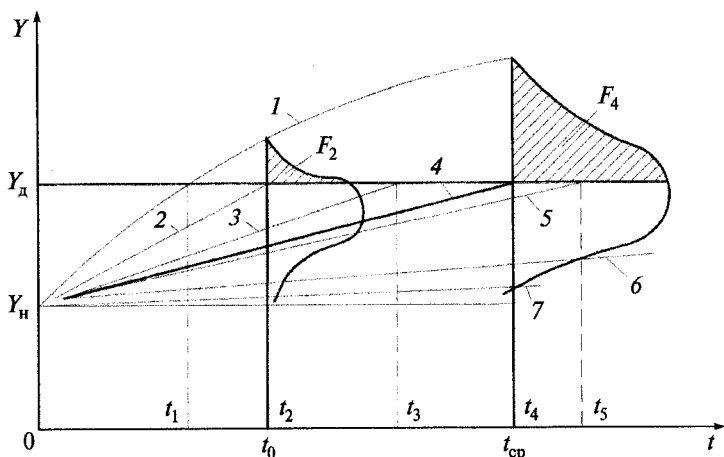


Рис. 8.6. Схема определения периодичности ТО по допустимому значению и закономерности изменения параметра технического состояния

Если принять периодичность ТО равной средней наработке, то часть автомобилей, интенсивность изменения параметра которых выше $\alpha_{\text{ср}}$, с высокой степенью вероятности откажет на наработках существенно ниже $t_{\text{ср}}$ (реализации 1, 2, 3). Для автомобиля 1, например, вероятность отказа составит: $F = F_4 = 0,5$.

При проведении технического обслуживания с меньшей периодичностью (например, t_1) обеспечивается высокая безотказность автомобилей, однако значительно недоиспользуются их потенциальные ресурсы.

Поэтому периодичность технического обслуживания в соответствии с этим методом выбирают такую, при которой вероятность отказа между плановыми ТО не превысит заданной величины R_d , например F_2 . При этом интенсивность изменения параметра технического состояния, превышающую среднюю по группе наблюдаемых АТС, называют максимально допустимой:

$$\alpha_d = \mu \cdot \alpha_{\text{ср}}, \quad (8.4)$$

где μ — коэффициент максимальной интенсивности изменения параметра технического состояния.

В этом случае должно соблюдаться условие:

$$1 - P_d(\alpha_i \leq \alpha_d) = 1 - F = R_d, \quad (8.5)$$

где P_d — допустимая вероятность безотказной работы; F — вероятность отказа на установленной периодичности обслуживания; α_i , α_d — текущее и максимально допустимое значения интенсивности изменения параметра технического состояния.

Данный метод определения периодичности ТО используется для элементов автомобиля с явно фиксированными показателями технического состояния (изнашиваемые узлы и механизмы, техническое состояние которых поддерживается проведением регулировочных работ). Достоинством метода является то, что он основан на информации, дающей более объективное представление о фактическом техническом состоянии машин, сформировавшемся в реальных, присущих данному предприятию, условиях. Однако отсутствие экономических критериев при оптимизации периодичности ТО может привести к необоснованному росту эксплуатационных затрат на поддержание изделий в работоспособном состоянии.

Более широкое распространение в системе управления техническим обслуживанием восстанавливаемых объектов получил **технико-экономический метод** определения периодичности ТО. Оптимальная периодичность в соответствии с этим методом принимается по критерию минимальных удельных затрат на ТО и ремонт (рис. 8.7).

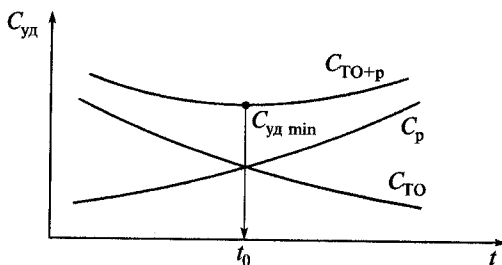


Рис. 8.7. Зависимость затрат на ТО и ремонт от периодичности ТО

В аналитической форме метод можно представить в виде целевой функции, экстремальное значение которой соответствует оптимальному решению

$$C_{уд} = C_{ТО}/t_0 + C_p/t_p \Rightarrow \min, \quad (8.6)$$

где $C_{ТО}$ — затраты на операции ТО; C_o — затраты на ремонтные воздействия; t_o — периодичность обслуживания; t_p — наработка между выполнением ремонтных воздействий.

Метод определения периодичности ТО автомобилей *по диагностической информации* базируется на индивидуальной оценке их технического состояния. Широкое внедрение в технологический процесс диагностирования обеспечивает систему ТО и ремонта информацией о фактическом состоянии автомобилей и позволяет более полно использовать их потенциальные возможности.

Планово-предупредительная система ТО и ремонта с применением технического диагностирования, как важного элемента этой системы, становится более гибкой и рациональной. С плановой (заданной) периодичностью здесь проводятся только контрольно-диагностические операции, а остальные выполняются по необходимости с учетом результатов диагностирования.

Техническое обслуживание, как уже отмечалось, предназначено для поддержания технического состояния автомобилей, их узлов и механизмов работоспособными. Однако из-за изнашивания деталей, усталостных и других эксплуатационных повреждений на определенной наработке автомобиль теряет свою работоспособность, которая может быть восстановлена только выполнением соответствующих операций ремонта.

8.1.3. Ремонт автомобилей и их агрегатов

Ремонт представляет собой комплекс операций по восстановлению исправного или работоспособного состояния изделий и восстановлению ресурсов машин и их составных частей.

Необходимость проведения ремонта машин может быть вызвана следующими причинами: выработкой ресурса потерей работоспособности; возникновением повреждений в процессе эксплуатации; ухудшением качества работы; снижением надежности и безопасности. В зависимости от этого ремонт предусматривает замену конструктивных элементов, выработавших свой ресурс, или восстановление работоспособного состояния машины вследствие возникновения отказа.

Замену элементов, выработавших свой ресурс, можно выполнять по плану, через определенный срок службы или наработки, а работоспособное состояние восстанавливается после возникновения отказа, т. е. в случайный момент времени. В соответствии с этим различают плановый и неплановый ремонты.

Плановый ремонт — ремонт, постановка на который осуществляется в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Неплановый ремонт — ремонт, постановка на который осуществляется без предварительного назначения для устранения последствий отказов или дорожно-транспортных происшествий.

ГОСТ 24212—80 предусматривает две стратегии ремонта машин: по наработке и по техническому состоянию.

Ремонт по наработке выполняется через определенный пробег с начала эксплуатации, а объем разборочных и других видов работ назначают единым для всего парка однотипных автомобилей, независимо от их технического состояния. Опыт работы авторемонтных предприятий показывает, что из-за большой вариации наработок конструктивных элементов до отказа ремонт по назначенной наработке приводит к значительному недоиспользованию их ресурса и увеличению затрат на восстановление утраченной работоспособности.

Избежать этого позволяет стратегия ремонта по **техническому состоянию**, которая предусматривает выполнение технологических операций, в том числе и разборки, по результатам диагностирования поступающих в ремонт изделий.

В соответствии с характером и назначением работ ремонт подразделяется на текущий (ТР), средний и капитальный (КР).

Текущий ремонт предназначен для устранения отказов и неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации или выявленных при выполнении технического обслуживания. Восстановление утраченной работоспособности при ТР осуществляется проведением разборочно-сборочных, регулировочных, слесарных, механических, сварочных и других работ с заменой: у автомобиля — отдельных узлов и агрегатов, требующих текущего или капитального ремонта; у агрегата — отдельных деталей (кроме базовых), достигших предельного состояния.

Текущий ремонт относится к неплановым ремонтам. Необходимость в его проведении определяется по заявкам водителей при возвращении автомобиля с линии, при проведении контрольно-диагностических работ ежедневного обслуживания, в процессе проведения профилактических технических обслуживаний.

Текущий ремонт должен обеспечивать безотказную работу отремонтированных агрегатов, узлов и деталей на пробеге, не меньшем, чем установленная периодичность ТО-2.

Для сокращения времени простоя автомобилей ТР выполняется преимущественно агрегатным методом, при котором производится замена неисправных или требующих капитального ремонта агрегатов и узлов на новые или отремонтированные (из оборотного фонда).

Средний ремонт предусмотрен для автомобилей, работающих в тяжелых дорожно-климатических условиях. Цель среднего ремонта автомобилей заключается в частичном восстановлении их ресурса и работоспособности с заменой составных частей, достигших предельного состояния. При проведении среднего ремонта выполняются такие работы, как оценка технического состояния всех агрегатов и механизмов, замена двигателя, достигшего предельного состояния, ремонт неисправных агрегатов с заменой или ремонтом деталей, другие работы по восстановлению исправного состояния автомобилей. Такой вид ремонта проводится, как правило, после выработки автомобилем 60 % ресурса.

Капитальный ремонт предназначен для регламентированного восстановления изделий, потерявших работоспособность, до нормативного уровня. В современных моделях автотранспортных средств долговечность рамы и кабины повышена до значений, близких сроку службы автомобиля, поэтому для них предусмотрен только капитальный ремонт агрегатов.

Агрегаты автомобилей направляются в капитальный ремонт, когда базовые и основные детали достигли предельного состояния, и их работоспособность не может быть восстановлена проведением текущего или среднего ремонта. Базовые и основные детали обеспечивают выполнение функциональных свойств агрегатов и определяют их эксплуатационную надежность. Поэтому их восстановление при капитальном ремонте должно обеспечивать уровень качества, близкий или равный качеству новых изделий.

При капитальном ремонте обеспечивается также восстановление до уровня новых изделий или близкого к нему: зазоров и натягов; взаимного расположения деталей (осей, плоскостей и т. д.); микро- и макрогеометрии рабочих поверхностей; структуры и твердости металла.

Капитальный и средний ремонты по принципам организации и целям выполнения относятся к плановым. Следует, однако, отметить, что плановая система ремонтов эффективна лишь тогда, когда она обеспечивает достаточно близкое соответствие планируемых сроков выполнения ремонтных работ и выработкой объектами из ресурсов.

Кроме рассмотренных видов ремонта, для восстановления работоспособности и обеспечения высокого уровня надежности машин предусмотрено проведение гарантийных и профилактических ремонтов.

Гарантийный ремонт выполняется для устранения конструктивных и производственных отказов, возникающих во время гарантийного пробега.

Профилактический ремонт проводится с целью замены конструктивных элементов, лимитирующих надежность агрегатов и не обеспечивающих их заданный межремонтный ресурс. К таким элементам относятся, например, быстроизнашивающиеся детали двигателя (шатунные и коренные подшипники, поршневые кольца). Профилактический ремонт проводится в соответствии нормативно-технической документацией завода — изготовителя машин.

Эффективность ТО и ремонта автомобилей определяется степенью выполнения заданных объемов и качеством работ, ростом производительности труда, снижением затрат на поддержание подвижного в технически исправном состоянии. Оценка уровня качества выполнения ТО и ремонта осуществляется с помощью ряда технико-экономических показателей, характеризующих, прежде всего, степень готовности подвижного состава к выполнению транспортной работы. В практической деятельности автотранспортных предприятий для этой цели могут быть использованы коэффициенты готовности K_r , технического использования $K_{ти}$ и технической готовности α_r .

Коэффициент готовности K_r , определяемый суммарным временем безотказной работы парка автомобилей и временем восстановления утраченной работоспособности (нахождением их в ремонте), характеризует в основном показатели надежности подвижного состава.

Коэффициент $K_{ти}$ является более информативным показателем, так как помимо этих составляющих учитывает и суммарное время нахождения автомобилей в техническом обслуживании. Однако и он не учитывает простои автомобилей по организационным и социальным причинам. Наиболее полно учитывает все факторы, определяющие готовность автомобилей к выполнению заданных функций, коэффициент технической готовности α_r .

Коэффициент технической готовности автомобилей α_r является важнейшим показателем качества деятельности всей технической службы автотранспортного предприятия, обобщающим как различ-

ные условия работы автомобилей, так и разный уровень выполнения ТО и ремонта. Он определяет долю рабочего времени, в течение которого автомобиль (парк) исправен и может быть использован в транспортном процессе. Его количественную оценку в эксплуатации определяют из отношения числа технически исправных автомобилей $A_{\text{ти}}$ к списочному $A_{\text{и}}$:

$$\alpha_{\text{т}} = A_{\text{ти}} / A_{\text{и}}. \quad (8.7)$$

Коэффициент $\alpha_{\text{т}}$, как критерий оценки технической службы АТП, оперативно показывает степень технической готовности подвижного состава, отражает количественное и качественное изменение его технического состояния.

8.3. Техническая диагностика машин

8.3.1. Основные понятия и определения

Широкий диапазон условий и режимов эксплуатации, а также вариация начальных показателей качества машины приводят к значительной вариации ее наработок до возникновения отказов и неисправностей. Поэтому проведение профилактических воздействий при постановке автомобилей в ТО в установленном нормативно-технической документацией объеме приводит, с одной стороны, к неполной реализации индивидуальных свойств автомобиля, повышению затрат на профилактические работы, с другой — далеко не в полной мере способствует улучшению его технического состояния. Наоборот, необоснованные вмешательства в работу сопряжений приводят к росту интенсивности процесса их изнашивания, повреждению крепёжных соединений, нарушению герметичности и т. д.

В связи с этим при проведении ТО и ремонта машин весьма важно иметь индивидуальную информацию об их техническом состоянии, скрытых и назревающих отказах, остаточном ресурсе, причинах нарушения работоспособности и т. п. Средством получения такой информации является техническая диагностика.

Технической диагностикой (ГОСТ 20911—89) называется отрасль знаний, изучающая признаки неисправностей машин, методы, средства и алгоритмы определения их технического состояния без разборок. Из этого определения следует, что техническая диагностика явля-

ется важным элементом в системе ТО и ремонта автомобилей. Она обосновывает методы и средства периодической проверки надежности и технической готовности агрегатов автомобиля без их разборки, оценивает соответствие параметров технического состояния требуемым значениям, определяет перечень и объемы работ ТО и ремонта с целью обеспечения надежной и безопасной работы.

Техническая диагностика непосредственно связана с теорией надежности, так как главной ее целью является своевременное обнаружение неработоспособного состояния машины, поиск возникших неисправностей и прогнозирование остаточного ресурса, что, в конечном счете, направлено на повышение надежности и эффективности эксплуатации машины. Общность теории надежности и технической диагностики проявляется также и в использовании схожей терминологии (неисправность, отказ, наработка на отказ, работоспособность и др.).

Техническая диагностика как научное направление ставит перед собой задачу изучения всего комплекса вопросов, связанных с оценкой технического состояния машины, т. е. состояния, которое характеризуется в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

Диагностированием называют процесс определения технического состояния объекта без его разборки путем измерения параметров, характеризующих его состояние, и сопоставления их с нормативными значениями.

Диагностирование не является самостоятельным технологическим процессом, оно является элементом системы ТО и ремонта, обеспечивающим индивидуальной информацией о техническом состоянии объекта. Наличие такой информации позволяет оптимизировать режимы регламентного контроля, оперативно выявлять потребность объекта в ремонте и ТО, проверять качество их выполнения, т. е. комплексно управлять техническим состоянием.

Диагностирование является качественно более совершенной формой контрольных работ и отличается от последних следующими признаками:

- объективностью и достоверностью оценки технического состояния сложных объектов без их разборки с помощью контрольно-измерительного оборудования, приборов и инструментов;

- возможностью определения технического состояния по выходным параметрам (мощности, топливной экономичности, тормозным качествам и др.);
- появлением условий для прогнозирования технического состояния объекта, его остаточного ресурса.

Результат диагностирования, т. е. заключение о техническом состоянии объекта, называется **диагнозом**. При диагностировании машин возможны различные варианты формирования диагноза. В случае положительного результата диагностирования, т. е. когда объект находится в работоспособном состоянии, желательно иметь информацию о запасе его исправной работы (прогнозирование остаточного ресурса). При отрицательном результате (объект неработоспособен) — заключение о конкретных отказах и неисправностях.

На рис. 8.8 приведена общая схема контроля работоспособности объекта диагностирования с прогнозированием технического состояния и поиском неисправностей.



Рис. 8.8. Схема технического диагностирования:
 R_d — заданная вероятность безотказной работы

В процессе диагностирования в общем случае принимают участие объект диагностирования, технические средства диагностирования и человек-оператор, которые в совокупности образуют **систему диагностирования**.

Функции человека-оператора изменяются в зависимости от степени механизации процесса диагностирования и от того, какое (рабочее или тестовое) диагностирование выполняется. Если процесс диагностирования полностью автоматизирован, функции человека-оператора сводятся к минимуму или исключаются из процесса диагностирования полностью.

Системы диагностирования подразделяют на *функциональные*, когда диагностирование проводят в процессе работы объекта, и *тестовые*, когда при измерении диагностических параметров работу объекта воспроизводят искусственно. Диагностические системы могут быть *общими*, когда объектом является изделие в целом, а назначением — оценка его состояния на уровне «годно — негодно», и *локальными*, предназначенными для углубленного диагностирования составных частей объекта (агрегатов, механизмов, систем).

В зависимости от используемых технических средств системы диагностирования могут быть *автоматизированными* и *ручными*. Автоматизации, прежде всего, подлежат операции получения информации о техническом состоянии, ее обработки и выдачи диагностического заключения (диагноза).

Любая система диагностирования предполагает установление закономерностей изменения параметров технического состояния объекта, обоснование комплекса диагностических параметров и их нормативных значений, выявление связей этих параметров с параметрами технического состояния, определение оптимальной процедуры (алгоритма) диагностирования.

Диагностирование конкретного объекта (автомобиля, агрегата, механизма) осуществляют в соответствии с алгоритмом, устанавливающим рациональную последовательность контрольных, регулировочных и других операций по устранению выявленных неисправностей. Он определяет вывод объекта на тестовый режим, постановку первичного диагноза, переход к следующему элементу, регулировочные и ремонтные операции, повторные и заключительные проверки. Алгоритм строят с учетом особенностей объекта и средств диагностирования и оптимизируют (сравнивая с другими вариантами) по экономическому критерию.

Окончательную детализацию процедуры диагностирования дает *технологическая карта*, которая включает порядковые номера операций и их трудоемкость, применяемое оборудование, исполнителей, коэффициенты повторяемости.

8.3.2. Методы и средства диагностирования

Работа автомобиля обусловлена взаимодействием различных по функциональному назначению и принципу действия агрегатов, механизмов и систем. Поэтому при контроле их технического состояния используются различные методы и средства диагностирования.

Существует два вида технического диагностирования автомобилей — общее и углубленное (поэлементное).

Общее диагностирование — диагностирование объекта по параметрам, характеризующим его техническое состояние по критерию «исправен — неисправен» без выявления конкретных неисправностей. Общее диагностирование используется в основном для оценки работоспособности агрегатов, механизмов и систем автомобилей, обеспечивающих безопасность движения (тормозные и рулевые управления, приборы освещения и сигнализации).

Углубленное диагностирование — диагностирование технического состояния агрегатов и узлов автомобилей с выявлением места, причины и характера возникших отказов и неисправностей.

Методы диагностирования характеризуются способами измерения и физической сущностью параметров, выбранных для оценки технического состояния автомобилей и их агрегатов, необходимой глубиной постановки диагноза.

В простейших случаях при отсутствии диагностического оборудования используются **субъективные** (органолептические) методы оценки технического состояния автомобилей с помощью органов чувств человека (зрения, слуха, обоняния, осязания) и простейших методов измерений (стетоскопов, манометров, линейек). В качестве диагностических параметров при этом служат утечки жидкостей и газов, очаги коррозии, стуки, шумы, вибрации и т. д. Техническое состояние целого ряда конструктивных элементов двигателя, например (сальника коленчатого вала, прокладки головки блока цилиндров, успокоителя цепи, башмака натяжителя цепи и др.), оценивается путем визуального осмотра без применения каких-либо средств инструментального контроля.

При оценке технического состояния современных автомобилей, оснащенных сложными агрегатами и системами, используются **объективные** методы диагностирования с помощью контрольно-измерительного оборудования, приборов и инструмента. Техническое состояние элементов автомобиля производится методом сравнения полученных значений диагностических параметров с их допустимыми нормативами.

Наиболее полную и достоверную информацию о техническом состоянии объекта дает рациональное сочетание объективных и субъективных методов диагностирования.

В зависимости от вида диагностических параметров в настоящее время используют три основные группы методов объективной диагностики автомобилей и их агрегатов (рис. 8.9).

Методы первой группы базируются на определении выходных *параметров рабочих процессов* диагностируемого объекта и параметров эффективности его функционирования по мощностным и топливно-экономическим показателям, тормозному пути или тормозным силам на колесах, механическим потерям в трансмиссии и т. д. Эти параметры определяют основные свойства объекта и дают обобщенную информацию о состоянии автомобиля и его агрегатов. Оценка технического состояния проводят на диагностических стендах или непосредственно на работающем автомобиле.

Методы оценки технического состояния по непосредственному измерению значений *геометрических параметров* определяют элементарные связи между деталями узлов и механизмов. Эти методы дают ограниченную, но конкретную информацию о состоянии объекта и используются в тех случаях, когда параметры доступны для их непосредственного измерения (зазоры, люфты, свободный ход педалей управления и др.).

При оценке технического состояния по параметрам сопутствующих процессов широко распространены следующие методы:

- *по герметичности* рабочих объемов агрегатов и узлов (цилиндропоршневая группа двигателя, пневматический привод тормозных систем, плотность прилегания клапанов, давление в шинах и др.);
- *по интенсивности тепловыделения* (тепловые методы), основанные на выделении тепла и изменении температуры в результате сгорания топлива и работы сил трения деталей двигателя, агрегатов ходовой части, подшипников и других сопряжений;



Рис. 8.9. Классификация методов диагностирования автомобилей

- по физико-химическому составу отработавших эксплуатационных материалов (проб отработавших масел в двигателе, коробке передач, главной передаче и выхлопных газов, оказывающих отрицательное влияние на окружающую среду).

Средствами технического диагностирования (СТД) автомобилей служат специальные приборы и стенды, предназначенные для измере-

ния текущих значений диагностических параметров. Они включают устройства для создания тестовых режимов, датчики, измерительные приборы, устройства отображения результатов измерений, устройства для автоматизации процессов диагностирования. В зависимости от характера взаимодействия с объектом диагностирования СТД подразделяются следующим образом:

- внешние, которые подсоединяются или работают с контролируемыми изделиями только во время проведения контроля и не являются элементами изделия;
- встроенные (бортовые), которые являются конструктивными элементами объекта и осуществляют контроль непрерывно или периодически по определенной программе;
- устанавливаемые на диагностируемый объект средства перед плановым или заявочным диагностированием (УСТД).

Внешние средства диагностирования могут быть стационарными (стенды тормозные, для проверки и регулировки углов установки колес и др.) и переносными (тестеры, газоанализаторы, дымомеры, компрессометры и др.).

Встроенные средства диагностирования включают входящие в конструкцию автомобиля датчики и приборы для измерения, микропроцессоры, устройства отображения диагностической информации. Простейшие средства встроенного диагностирования располагаются на панели (щитке) приборов перед водителем. Более сложные средства встроенного диагностирования позволяют водителю контролировать состояние тормозных систем, расход топлива, токсичность отработанных газов и др.

Недостатком сложных средств встроенного диагностирования является необходимость оборудования каждого автомобиля дорогостоящей аппаратурой. Поэтому вместо встроенных средств диагностирования, которые устанавливаются на каждый автомобиль, в последнее время получили развитие так называемые периодически устанавливаемые СТД. Конструктивно они выполняются в виде блока, в котором расположены средства получения, обработки, хранения и выдачи диагностической информации. Блок устанавливается на планируемый для диагностирования автомобиль перед его выходом на линию и снимается после возвращения в парк. Это позволяет существенно снизить затраты на средства диагностирования, так как значительно уменьшается их количество.

При изготовлении современных СТД широко используется электронная и компьютерная техника, что позволяет получать диагностическую информацию с высокой степенью точности в виде цифровой индикации, графиков, диаграмм или таблиц.

8.3.3. Диагностические параметры и обоснование их выбора

Техническое состояние машин (агрегатов, узлов, механизмов) определяется, как уже отмечалось, значениями структурных параметров, которые в процессе эксплуатации претерпевают различные изменения. К структурным параметрам, относятся зазоры в сопряжениях, изменение формы и размеров деталей, другие параметры, измерение которых связано с необходимостью проведения разборочно-сборочных работ. Это повышает трудоемкость контроля и существенно снижает ресурс контролируемого объекта.

Изменения структурных параметров сопровождается изменениями параметров рабочих и сопутствующих выходных процессов, которые могут измеряться без разборки контролируемого объекта. Такие параметры носят название диагностических.

Диагностические параметры — это косвенные величины, связанные со структурными параметрами, доступные измерению и несущие достаточную информацию о техническом состоянии объекта. Между структурными Y и диагностическими S параметрами в зависимости от сложности объекта существуют различные взаимосвязи (рис. 8.10).

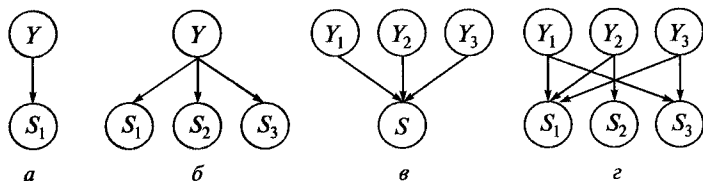


Рис. 8.10. Взаимосвязи диагностических и структурных параметров

Эти связи могут быть единичными (см. рис. 8.10, а), если с изменением конкретного структурного параметра изменяется один диагностический; множественными (см. рис. 8.10, б), если изменение одного структурного параметра ведет к изменению нескольких диагностиче-

ских; неопределенными (см. рис. 8.10, *в*), когда один диагностический параметр может изменяться при изменении нескольких структурных; комбинированными (см. рис. 8.10, *г*), когда возможны комбинации вышеперечисленных связей.

По объему и характеру получаемой информации диагностические параметры подразделяются на общие, частные и взаимозависимые. *Общие параметры* определяют техническое состояние диагностируемого объекта в целом, без локализации конкретных неисправностей. *Частные параметры* указывают на конкретную неисправность и используются при углубленном диагностировании объекта. *Взаимозависимые параметры* оценивают техническое состояние объекта только по совокупности нескольких измеренных параметров.

В качестве диагностических параметров при оценке технического состояния автомобилей, как уже отмечалось, используются выходные параметры рабочих и сопутствующих процессов, а также геометрические параметры. Однако по разным причинам далеко не все выходные параметры используются при диагностировании технического состояния автомобилей и их агрегатов.

Из всего комплекса диагностических параметров выбираются лишь те, которые удовлетворяют требованиям однозначности, стабильности, чувствительности, информативности и технологичности.

Под **однозначностью** понимают соответствие каждому значению диагностического параметра S только одного состояния диагностируемого объекта (рис. 8.11). Это означает, что в диапазоне изменения структурного параметра Y от начального значения до предельного функция диагностического параметра $S = f(Y)$ не имеет экстремума.

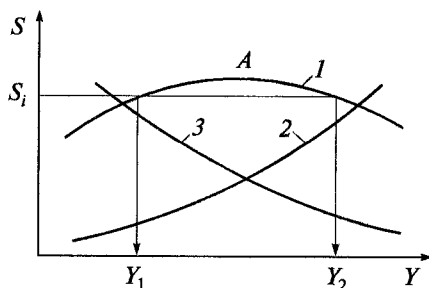


Рис. 8.11. Закономерности изменения диагностических параметров:

1 — не обладающий однозначной зависимостью (имеется экстремум в точке *A*);
2 и *3* — обладающие однозначной зависимостью

Стабильность диагностического параметра определяется отклонениями его величины от среднего значения при неизменных условиях измерений объекта (рис. 8.12).

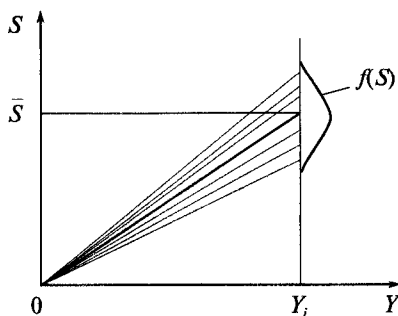


Рис. 8.12. Распределение результатов измерения диагностического параметра S_i

Это свойство диагностического параметра характеризует достоверность диагноза и может быть оценено величиной среднего квадратического отклонения, характеризующего меру рассеивания диагностического параметра S_i вокруг центра группирования $\bar{S}$

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n-1}}, \quad (8.8)$$

где n — число измерений диагностического параметра.

Чувствительность ϕ диагностического параметра характеризуется изменением его значения с изменением структурного параметра (рис. 8.13). Из приведенной схемы видно, что при изменении струк-

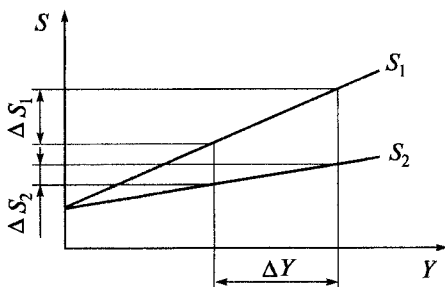


Рис. 8.13. Схема определения чувствительности диагностических параметров

турного параметра на величину ΔY диагностические параметры S_1 и S_2 изменились на разную величину ($\Delta S_1 > \Delta S_2$). Следовательно, чувствительность диагностического параметра S_1 при оценке технического состояния объекта больше чувствительности параметра S_2 , т. е. $\phi_1 > \phi_2$.

По результатам испытаний чувствительность диагностического параметра оценивается коэффициентом чувствительности

$$K_{\text{ч}} = \left| \frac{dS}{dY} \right|. \quad (8.9)$$

Информативность диагностического параметра является его важнейшим свойством при оценке технического состояния сложных систем. Она определяется снижением исходной энтропии (т. е. неопределенности технического состояния объекта) после измерения данного диагностического параметра

$$I = H_{\text{н}} - H_i, \quad (8.10)$$

где $H_{\text{н}}$, H_i — неопределенность (энтропия) состояния объекта до и после измерения i -го диагностического параметра.

При диагностировании автомобиля, как сложной системы, используется комплекс диагностических параметров, информативность которых различна. Если диагностический параметр малоинформативен, то распределение их значений у большого числа технически исправных и неисправных объектов отличается незначительно. Это означает, что диагностический параметр не позволяет с достаточной надежностью отличить исправный объект от неисправного (рис. 8.14, а). В том случае когда диагностический параметр обладает высокой информативностью, распределение исправных объектов существенно отличается от неисправных, и чем больше это отличие, тем выше информативность диагностического параметра (рис. 8.14, б).

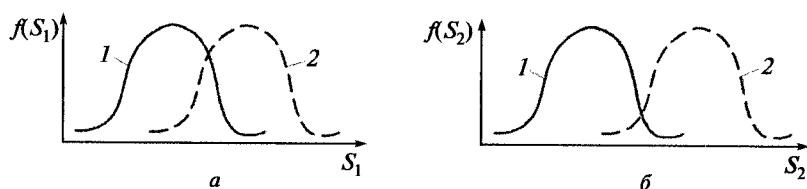


Рис. 8.14. Распределение значений малоинформативного S_1 (а) и высокоинформативного S_2 (б) диагностических параметров:

1, 2 — исправное и неисправное состояния объектов

Технологичность измерения параметра определяется удобством подключения диагностической аппаратуры, простотой измерения и обработки полученных результатов.

Вполне очевидно, что чем больше диагностические параметры удовлетворяют рассматриваемым требованиям, тем эффективнее их использование при определении технического состояния объекта.

Процедура выбора диагностических параметров предусматривает следующие этапы:

- анализ статистических данных по эксплуатационным отказам и неисправностям с целью выявления наименее надежных составных частей и наиболее часто повторяющихся неисправностей;
- разработка структурно-следственной модели диагностируемого объекта;
- разработка методики поиска неисправностей и алгоритма диагностирования.

Статистические данные по эксплуатационной надежности агрегатов, узлов и систем автомобилей (характерные отказы и неисправности, наработки до их возникновения, интегральные и дифференциальные функции распределения наработок и др.) получают по результатам проведения эксплуатационных испытаний.

Кроме закономерностей изменения технического состояния механизмов и узлов объекта диагностирования, необходимо обобщенное описание его наиболее важных свойств: перечень наиболее часто отказывающих элементов, соответствующие этим элементам структурные и диагностические параметры и связи между ними. Наиболее простое логическое описание объекта диагностирования выражается его структурно-следственной схемой, разрабатываемой по принципу многоуровневой цепочки, которая определяет следующие уровни поиска неисправностей:

- 1 — основные узлы и механизмы диагностируемого объекта;
- 2 — сопряжения и конструктивные элементы, в процессе эксплуатации которых возникают неисправности;
- 3 — структурные параметры, характеризующие техническое состояние узлов и конструктивных элементов;
- 4 — характерные неисправности объекта;
- 5 — симптомы проявления неисправностей;
- 6 — перечень возможных для использования диагностических параметров.

Структурно-следственная схема разрабатывается на основе инженерного изучения объекта диагностирования и результатов исследования эксплуатационной надежности его конструктивных элементов. Выявленный при этом перечень возникающих в процессе эксплуатации объекта неисправностей и симптомов их проявления позволяют определить предварительный комплекс диагностических параметров для оценки его технического состояния. Окончательный выбор диагностических параметров осуществляется на основе анализа их соответствия вышеизложенным требованиям (однозначности, стабильности, чувствительности, информативности и технологичности).

На рис. 8.15 в качестве примера представлена схема структурно-следственных связей рулевого управления.

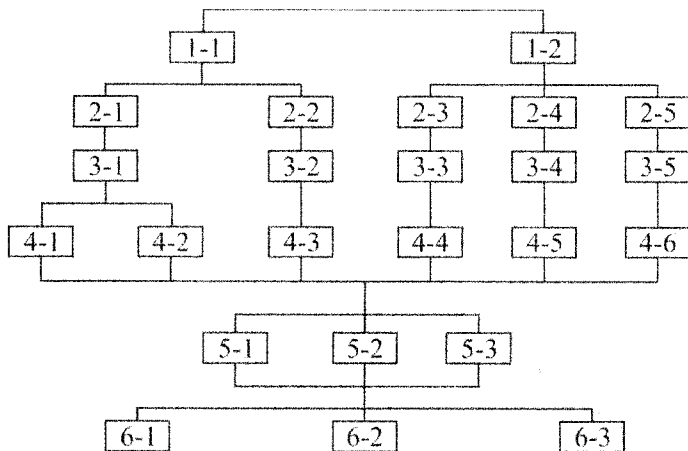


Рис. 8.15. Блок-схема структурно-следственных связей рулевого управления переднеприводного автомобиля семейства ВАЗ:

1-1 — рулевой механизм; 1-2 — рулевой привод; 2-1 — сопряжение рейка — приводная шестерня рулевого механизма; 2-2 — эластичная муфта рулевого вала; 2-3 — рулевые тяги; 2-4 — шаровые шарниры рулевых тяг; 2-5 — резинометаллические шарниры рулевых тяг; 3-1 — зазор в рулевом механизме; 3-2 — зазор в соединениях эластичной муфты; 3-3 — длина тяги; 3-4 — люфт в шаровых шарнирах рулевых тяг; 3-5 — зазор в сопряжении шарнира; 4-1 — износ рейки и приводной шестерни рулевого механизма; 4-2 — износ опорных втулок рейки; 4-3 — износ заклепочного соединения; 4-4 — деформация рулевых тяг; 4-5 — износ шарового пальца или ослабление пружины шарового шарнира рулевой тяги; 4-6 — износ деталей шарнира; 5-1 — нарушение устойчивости и управляемости автомобиля; 5-2 — интенсивный износ шин; 5-3 — повышенный расход топлива; 6-1 — суммарный люфт в рулевом управлении; 6-2 — нарушение углов установки колес; 6-3 — увод автомобиля от заданной траектории движения

Из схемы видно, что параметры шестого уровня (суммарный люфт в рулевом управлении, углы установки управляемых колес, увод автомобиля от заданной траектории движения) с достаточной степенью точности оценивают эксплуатационные свойства рулевого управления, что позволяет использовать их в качестве диагностических.

Для повышения эффективности процесса диагностирования следует из всех возможных проверок проводить только необходимые и в совершенно определенной последовательности в соответствии с алгоритмом. Алгоритм диагностирования должен быть построен таким образом, чтобы по выбранному перечню параметров определить работоспособность системы и локализовать имеющиеся неисправности с минимальными затратами.

Локализация неисправностей, т. е. их поиск и устранение, является неотъемлемой частью технологического процесса диагностирования. Основные метрологические требования, которым должны удовлетворять методы и средства локализации неисправностей, не отличаются от требований к самому процессу диагностирования. К ним относятся точность, достоверность, быстроедействие и эффективность.

8.3.4. Нормирование диагностических параметров

Важнейшим этапом разработки системы диагностирования является определение нормативных значений диагностических параметров, количественно оценивающих техническое состояние объекта. В качестве нормативных показателей (или просто нормативов) при диагностировании автомобилей и их элементов служат: номинальное S_n , предельное S_p и допустимое S_d значения.

В общем случае для определения нормативных значений диагностических параметров используются три метода:

- назначения предельного значения на основе толерантных границ (при ограниченной статистической информации);
- определения допустимого значения по матрице переходных вероятностей (изменение диагностического параметра по работе носит стохастический, непрогнозируемый характер);
- определения нормативных значений диагностического параметра по его связи со структурным параметром.

Применение каждого из этих методов обуславливается информацией о реализациях диагностических параметров и о характере их

связей с показателями работоспособности агрегата. Наибольшее распространение для диагностирования автотранспортных средств получил третий метод. Он предполагает определение нормативных значений диагностических параметров по их связям со структурными параметрами при минимизации удельных затрат на эксплуатацию, ТО и ремонт.

Номинальное значение диагностического параметра S_n определяет исходное состояние объекта и соответствует новым, технически исправным машинам, агрегатам, узлам. Он может быть задан техническими условиями (тормозной путь, люфт рулевого колеса, сходжение и развал колес и др.) или найден как средняя величина для данной совокупности объектов.

Предельное значение параметра S_p соответствует такому состоянию объекта, когда его дальнейшая эксплуатация становится технически невозможной или экономически невыгодной. Он устанавливается по техническим или технико-экономическим критериям, которые определяют возникновение отказа (неисправности) или экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Допустимое значение диагностического параметра S_d представляет собой ужесточенную величину предельного, при которой обеспечивается заданный уровень безотказной работы на межконтрольной наработке.

Диагностические нормативы можно подразделить на три основные группы:

- устанавливаемые государственными стандартами;
- определяемые конструктивными и технологическими факторами при изготовлении объекта;
- определяемые статистическими методами с учетом реальных условий эксплуатации.

Нормативы первой группы устанавливаются для узлов и систем, обеспечивающих безопасность движения автомобиля или оказывающих отрицательное влияние на окружающую среду. К ним относятся параметры, оценивающие техническое состояние тормозного и рулевого управлений, шин, колес, систем освещения и сигнализации, а также параметры контроля состава отработавших газов и шума. Эти параметры подлежат строгому соблюдению, и их индивидуальная корректировка возможна только в сторону ужесточения.

Ко *второй группе* относятся диагностические параметры, устанавливаемые техническими условиями заводов-изготовителей или инст-

ружками по эксплуатации изделий. Это, например, зазоры в различных сопряжениях, углы установки колес, люфты и т. д.

Нормативные значения диагностических параметров этого вида устанавливаются на основании исследований их функциональных связей с нормативными значениями структурных параметров, которые определяются на стадии разработки объектов и проведении их испытаний.

Нормативы третьей группы составляют параметры, на интенсивность изменения которых существенное влияние оказывают условия эксплуатации, из-за чего они не могут быть едиными для всех изделий. Их определение осуществляется дифференцированно для конкретных условий эксплуатации с помощью статистического метода, учитывающего закономерности и интенсивность изменения технического состояния объекта.

Сущность метода заключается в том, что по результатам обследования представительной партии автомобилей строится гистограмма распределения значений диагностического параметра и аппроксимирующая ее теоретическая кривая. Предполагается, что полученное распределение содержит диагностические параметры, оценивающие только исправные объекты (объекты с неисправным состоянием из выборки исключаются). Тем не менее, следует помнить, что крайние значения диагностических параметров в распределении могут соответствовать как исправному, так и неисправному состоянию объекта.

Поэтому, по аналогии с принятой в теории надежности методикой, область рассеивания значений диагностического параметра ограничивают пределами, соответствующими требуемому уровню вероятности безотказной работы. Полученные таким образом граничные значения полученного распределения считают предельными нормативами диагностического параметра S_n (рис. 8.16).

Предельные диагностические нормативы, разграничивающие распределения исправных и неисправных состояний диагностируемого объекта устанавливают с учетом ошибок I и II рода, возможных при постановке диагноза.

Ошибка I рода (ложная неисправность) — это признание объекта неисправным, тогда как на самом деле он еще в исправном состоянии. Ошибка II рода (пропуск неисправности) — это признание диагностируемого объекта исправным, когда фактически он находится в неисправном состоянии. Вероятности этих ошибок зависят от установленного норматива S_n . Практика эксплуатации автомобилей по-

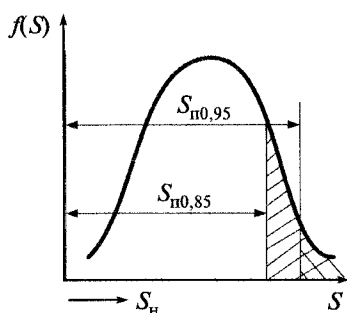


Рис. 8.16. Схема определения предельных нормативов диагностических параметров

казывает, что все значения диагностического параметра, находящиеся в пределах рассеивания, ограниченном уровнем вероятности $P \leq 0,85$, соответствуют исправному состоянию. Ошибка II рода (пропуск неисправности) при этом будет минимальна.

Значения параметра, выходящие за пределы рассеивания $S_{0,95}$, ограниченного уровнем вероятности $P \geq 0,95$, соответствуют неисправному состоянию и минимальному значению ошибки I рода. Значения параметра внутри диапазона $S_{п0,85} - S_{п0,95}$ будут соответствовать как исправному, так и неисправному состоянию. Вероятности обоих состояний при этом можно считать одинаковыми, т. е. ошибки I и II рода составят примерно 5 %.

Предельные нормативы для наиболее ответственных узлов и систем (например, непосредственно влияющих на безопасность движения), ошибки II рода для которых должны быть минимальными, ограничиваются более жестким 85%-ным уровнем вероятности безотказной работы. Для остальных механизмов из экономических соображений указанное ограничение менее жесткое, 95%-ное.

Практическая реализация процедуры определения предельных значений диагностических параметров, учитывающих условия эксплуатации, включает следующие этапы:

- по результатам измерения диагностических параметров представительной выборки автомобилей, находящихся в исправном состоянии, строится гистограмма и аппроксимирующий ее теоретический закон распределения;
- находятся параметры распределения (среднее значение $\bar{S}$, среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации ν);

- по виду гистограммы и значению коэффициента вариации v подбирается теоретический закон распределения случайной величины диагностического параметра с проверкой правильности выбора по критерию согласия χ^2 Пирсона;
- зная закон распределения диагностического параметра и принятый уровень вероятности P (0,85 или 0,95), определяют его предельные нормативы.

Для узлов и систем автомобиля, непосредственно влияющих на безопасность движения, например, при нормальном законе распределения диагностического параметра и верхнем ограничении предельный норматив определяется из выражения

$$S_{п0,85} = \bar{S} + \sigma. \quad (8.11)$$

При двухстороннем ограничении (для возрастающей и убывающей функций диагностического параметра) предельные нормативы равны

$$S_{п0,85} = \bar{S} \pm 1,5\sigma. \quad (8.12)$$

В системе управления техническим состоянием автомобилей в качестве нормативов целесообразно использовать не предельное $S_{п}$, а допустимое $S_{д}$ значение диагностического параметра, которое определяется при наличии зависимости его изменения по наработке.

Для постепенных отказов изменение диагностического параметра по наработке с достаточной степенью точности может быть описано степенной функцией

$$S = S_{н} + vt^{\alpha}, \quad (8.13)$$

где $S_{н}$ — начальное значение диагностического параметра; v — интенсивность изменения параметра по наработке; t — наработка изделия; α — показатель степени, определяющий характер и степень зависимости параметра S от наработки t .

Тогда, зная межконтрольную наработку (периодичность диагностирования $t_{д}$), величину предельного норматива $S_{п}$ и скорость изменения параметра v , значение допустимого норматива определяется из выражения

$$S_{д} = v \left(\alpha \sqrt[\alpha]{\frac{S_{п}}{v}} - t_{д} \right). \quad (8.14)$$

Полученные значения предельных и допустимых нормативов диагностических параметров являются основными элементами в системе управления техническим состоянием узлов, механизмов и систем автомобилей. Отклонение значений параметров за пределы допуска, вызываемые возникновением неисправностей, служит основой для принятия решения о проведении необходимых технических воздействий (операций углубленного диагностирования, регулировок, ремонта и т. д.).

Пример. Определить предельное значение люфта рулевого колеса $\alpha_{\text{рм}}^{\text{пр}}$, вызванное изменением зазора в зубчатом зацеплении рулевого механизма переднеприводного автомобиля ВАЗ-2115.

Результаты измерения значений люфта в рулевом механизме $\alpha_{\text{рм}}$ выборки обследования ($n = 23$ ед.) представлены в табл. 8.3.

Таблица 8.3. Результаты измерений люфтов в рулевом механизме

№ п/п	$\alpha_{\text{рм}}$	№ п/п	$\alpha_{\text{рм}}$	№ п/п	$\alpha_{\text{рм}}$
1	2,3	9	1,9	17	2,1
2	1,8	10	1,7	18	2
3	2,3	11	2,2	19	2
4	1,8	12	2,1	20	2,2
5	2,4	13	2,2	21	2,4
6	2,2	14	2,3	22	2,1
7	2,3	15	2,4	23	2,1
8	1,8	16	1,9		

По результатам измерений с помощью программы STATISTICA строим гистограмму распределения диагностического параметра $\alpha_{\text{рм}}$, аппроксимирующий ее теоретический закон (рис. 8.17) и определяем числовые характеристики полученного распределения:

- среднее арифметическое результатов измерений:

$$\bar{\alpha}_{\text{рм}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_{\text{рм}i} = 2,126 \text{ град.};$$

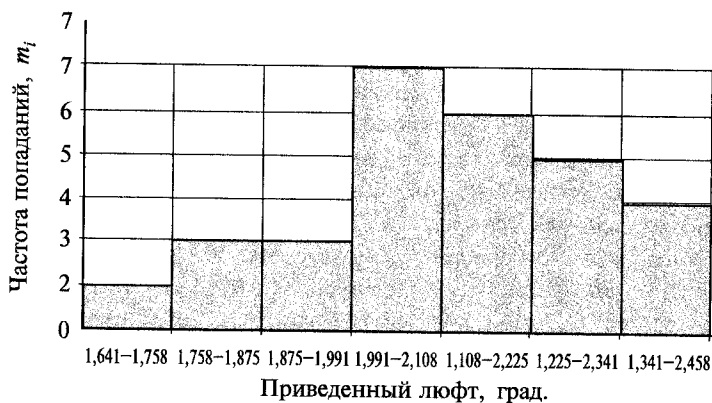


Рис. 8.17. Гистограмма распределения значений люфта α_{pm} , град.

- среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma(\alpha_{pm}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_{pmi} - \bar{\alpha}_{pm})^2} = 0,202 \text{ град};$$

- коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma(\alpha_{pm})}{\bar{\alpha}_{pm}} = 0,10.$$

По виду гистограммы и значению коэффициента вариации $v = 0,1$ предполагаем, что распределение значений люфта подчиняется нормальному закону. Проверка гипотезы о нормальном распределении экспериментальных данных по критерию согласия подтвердила правильность выбора теоретического закона.

Предельный норматив люфта в рулевом механизме $\alpha_{pm}^{пр}$, ограниченный уровнем вероятности $P \leq 0,85$, находим по формуле (8.11):

$$\alpha_{pm}^{пр} = 2,126 + 0,202 = 2,3 \text{ град.}$$

8.3.5. Прогнозирование остаточного ресурса

Одной из основных задач диагностирования является прогнозирование остаточного ресурса объекта, под которым понимается определение продолжительности его исправной работы до возникновения

предельного состояния. Современные методы прогнозирования технического состояния машин подразделяются на три основные группы.

1. Методы экспертных оценок, сущность которых сводится к обобщению, статистической обработке и анализу мнений специалистов. Эксперты обосновывают свою точку зрения на собственном опыте, литературных данных, анализе эксплуатационной надежности узлов и механизмов автомобилей и т. д.

2. Методы моделирования, базирующиеся на основных положениях теории подобия, формировании модели изучаемого объекта, проведении экспериментальных исследований и пересчете полученных показателей с модели на натуральный объект.

3. Статистические методы, из которых наиболее широкое распространение получил *метод экстраполяции*.

Процесс прогнозирования остаточного ресурса с использованием статистических методов включает следующие этапы:

- построение графика изменения прогнозируемого параметра по статистическим данным;
- разработка аналитического уравнения, описывающего закономерности изменения диагностического параметра во времени или по наработке;
- экстраполяция полученного уравнения и прогнозирование остаточного ресурса объекта.

При прогнозировании надежности машин и их элементов в качестве аналитического уравнения чаще всего используется степенная зависимость, описываемая выражением (8.13).

Полный ресурс объекта t_n при такой зависимости диагностического параметра по наработке определяется из выражения

$$t_n = \alpha \sqrt[a]{\frac{S_n - S_H}{v}}. \quad (8.15)$$

Остаточный ресурс t_o после некоторой наработки t_i определяется по формуле

$$t_o = t \left[\left(\frac{S_n - S_H}{S_i - S_H} \right)^{\frac{1}{a}} - 1 \right], \quad (8.16)$$

где S_i , S_n — текущее и предельное значения диагностического параметра.

Значения показателя α определяются опытным путем для различных сопряжений механизмов на основе обработки статистического материала и представляют собой некоторые усредненные величины. Для оценки технического состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя ЗМЗ-4063.10, например, значения показателя α , найденные по результатам экспериментальных исследований, приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Значения показателя α для параметров диагностирования технического состояния ЦПГ

№ п/п	Диагностический параметр	Показатель α
1	Давление в конце такта сжатия, кгс/см ²	1,3
2	Значение относительной утечки воздуха при положении поршня в ВМТ, кг/см ² в течение не менее 5 с	1,6
3	Расход картерных газов при 4000 мин ⁻¹ , л/мин не более	1,5
4	Значение давления в главной масляной магистрали, кгс/см ²	1,4

Пример. Определить остаточный ресурс цилиндропоршневой группы двигателя ЗМЗ — 4063.10 на пробеге 154 тыс. км.

Остаточный ресурс рассчитывается по каждому диагностическому параметру, и в качестве основного принимается его минимальное значение. По параметру давления в конце такта сжатия, например, на этой наработке его текущее значение составило 11 кгс/см² при номинальном 12 кгс/см² и предельном 9,6 кгс/см². Прогнозируемый остаточный ресурс ЦПГ двигателя до достижения им предельного состояния будет равен:

$$t_0 = 154 \left[\left(\frac{9,6 - 12}{11 - 12} \right)^{\frac{1}{1,3}} - 1 \right] = 148 \text{ тыс. км.}$$

По остальным диагностическим параметрам рассчитанные значения остаточного ресурса приведены в табл. 8.5.

В результате выполненных расчетов прогнозируемый остаточный ресурс ЦПГ принимает минимальное значение по параметру «давление

Таблица 8.5. Значения остаточного ресурса ЦПГ по результатам диагностирования

Диагностический параметр	Значение параметра			t_0 , тыс. км
	текущее	номинальное	предельное	
Относительная утечка воздуха при положении поршня в ВМТ в течение не менее 5 с с $1,5 \text{ кгс/см}^2$ до:	0,9	1,0	0,75	119
Расход картерных газов при 4000 мин^{-1} , л/мин	40	22	62	108
Давление в главной масляной магистрали при 2500 мин^{-1} , кгс/см^2	4	5	3	99

ние в главной масляной магистрали», в соответствии с которым $t_0 = 99$ тыс. км.

Учитывая то, что диагностирование автомобилей проводится в основном периодически по плану, задача прогнозирования их остаточного ресурса заключается в определении возможности их безотказной работы до осуществления очередного ТО. Эта задача может быть выполнена только при наличии в системе управления техническим состоянием автомобилей допустимых диагностических нормативов и оптимальных периодичностей диагностирования.

Под **оптимальной периодичностью диагностирования** в данном случае следует понимать такую периодичность, которая обеспечивает безотказную работу системы при минимальных удельных затратах на контрольные операции, техническое обслуживание и ремонты.

В основе определения оптимальной периодичности диагностирования агрегата, узла, как и обоснования регламентной периодичности технического обслуживания, лежат закономерности изменения их технического состояния по наработке и экономические показатели (удельные затраты на поддержание работоспособного состояния).

Обосновав оптимальную периодичность диагностирования t_d каждого механизма, ее приурочивают к плановой периодичности соответствующего вида технического обслуживания t_p .

Определение периодичности диагностирования при оценке технического состояния автомобиля может осуществляться несколькими методами в зависимости от выбранного критерия оптимизации.

Метод определения периодичности диагностирования по **допустимому уровню вероятности безотказной работы** основан на выборе такой периодичности диагностирования t_d , при которой вероятность отказа изделия не превышает установленной величины R_d (рис. 8.18).

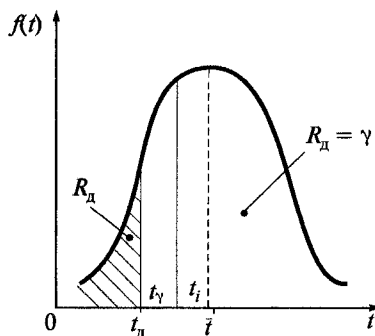


Рис. 8.18. Схема определения оптимальной периодичности диагностирования по допустимой вероятности безотказной работы

В соответствии с этим методом она принимается, как правило, равной гамма-процентному ресурсу t_γ и определяется из выражения

$$R_d = 1 - P_d = \int_0^{t_d} f(t) dt. \quad (8.17)$$

Такая периодичность диагностирования позволяет предотвратить все отказы, лежащие в распределении наработок справа от величины $t_d = t_\gamma$, и обеспечивает высокий уровень безотказной работы автомобиля на наработке между проведением очередных диагностических операций ($P_d = 0,95-0,98$ — для узлов и систем, непосредственно влияющих на безопасность движения, и $P_d = 0,85-0,90$ — для прочих элементов).

Метод определения t_d по **частной реализации диагностического параметра** предполагает наличие функции, описывающей изменение диагностического параметра по наработке от начального S_n до предельного S_n значений. Пользуясь этой функцией (8.13), по формулам (8.15) и (8.16) можно определить полный t_n и остаточный t_o ресурсы диагностируемого механизма после некоторой наработки t_i (рис. 8.19).

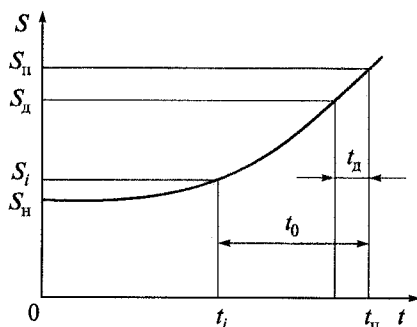


Рис. 8.19. Схема определения периодичности диагностирования по частной реализации диагностического параметра

В случае когда диагностирование выполняют при проведении планового ТО, т. е. когда периодичность $t_d = t_p$, прогнозирование исправной работы автомобиля осуществляется сравнением остаточного ресурса t_o с периодичностью t_p .

Если значение остаточного ресурса $t_o > t_p$, состояние диагностируемого механизма обеспечит его исправную работу до очередного ТО. В случае если $t_o < t_p$, возникает необходимость в проведении профилактических или ремонтных воздействий по предупреждению возможных отказов.

Процедуру прогнозирования можно упростить, заменив предельный диагностический норматив S_n допустимым (упреждающим) нормативом S_d . Для этого ужесточают значение S_n на величину приращения диагностического параметра за наработку, равную периодичности t_p .

Экономико-вероятностный метод определения периодичности диагностирования предусматривает расширение номенклатуры операций ТО за счет принудительного выполнения некоторых ремонтных работ, носящих профилактический характер [26]. Метод позволяет сравнивать различные стратегии и системы поддержания и восстановления работоспособности транспортного средства.

Одна из стратегий сводится к устранению неисправностей изделия по мере их возникновения. Удельные затраты при этом:

$$C_{уд} = \frac{C}{\bar{t}}, \quad (8.18)$$

где $\bar{t}$ — средняя наработка на отказ; C — затраты на устранение отказа.

Альтернативная стратегия предусматривает предупреждение отказов и неисправностей восстановлением исходного или близкого к нему состояния изделия до того, как им будет достигнуто предельное состояние. Периодичность t_d устанавливается из условия минимума суммарных удельных затрат на ТО и ремонт $C_{уд}$ при определенном соотношении стоимостных показателей ремонтных операций, выполняемых принудительно d и по потребности c при заданных характеристиках закона распределения наработок

$$C_{уд} = \frac{cF + dP}{t_d + t_p F} \Rightarrow \min, \quad (8.19)$$

где P — вероятность проведения предупредительной замены при ТО; F — вероятность отказа при выполнении технических воздействий (ТВ) с периодичностью t_p ; c — разовая стоимость устранения отказа; d — разовая стоимость профилактических работ; $t_{cp} = f(t_d)$ — средняя наработка на отказ элементов, отказавших с вероятностью F .

Решение этой задачи требует проведения дополнительных статистических исследований по определению функции $F(t)$ и ее числовых характеристик.

Пример. Определить оптимальную периодичность диагностирования рулевого управления (РУ) автомобиля ВАЗ — 2115 с использованием экономико-вероятностного метода. Исходные данные для расчета:

- стоимость одного нормочаса ТО и ремонта — 550¹ руб.
- средняя стоимость шаровых шарниров — 768² руб.

Нормативная трудоемкость: ремонта шаровых шарниров без снятия РМ — 0,67 чел-ч; ремонта шаровых шарниров со снятием РМ — 0,29 чел-ч; диагностирования РУ — 0,2 чел-ч; диагностирования РУ и передней подвески — 0,8 чел-ч; ремонта РУ со снятием рулевого механизма — 2,25 чел-ч; демонтажа рулевого механизма в сборе — 2,0 чел-ч.

Результаты расчета сведем в табл. 8.6.

В инженерной практике определение минимума целевой функции $C_{уд}$, а следовательно, оптимального значения периодичности ди-

¹ Стоимость одного нормативного часа работ взята из прайс-листа СТОА ООО «М-Авто» на 1 июня 2013 г.

² Стоимостные показатели получены в результате обзора рынка запасных частей на 1 июня 2013 г.

Таблица 8.6. Результаты расчета оптимальной периодичности диагностирования экономико-вероятностным методом

№ п/п	t_d , тыс. км	F	$C_{ТО, д}$, руб./1000 км	$C_{ТР}$, руб./1000 км	$C_{ТО, д и ТР}$, руб./1000 км
1	0	0,0001	550	47,57	597,57
2	3,3	0,0003	166,67	51,65	218,32
3	6,79	0,0053	81	56,81	137,81
4	10,28	0,0083	53,5	63,12	116,62
5	13,77	0,02	39,94	71	110,94
6	17,26	0,0353	31,87	81,13	113
7	20,75	0,2118	26,51	94,64	121,15
8	24,25	0,4236	22,68	113,59	136,27
9	27,74	0,753	19,83	141,95	161,78
10	31,24	0,8942	17,61	189,36	206,97
11	34,73	0,9765	15,84	283,91	299,75
12	38,23	0,9883	14,39	568,62	583,01
13	41,72	1	13,18	1984,5	1997,68

агностирования t_d чаще выполняется графически. Построенный по результатам расчета график (рис. 8.20), показывает, что оптимальная периодичность диагностирования РУ составляет $t_d \approx 16\,500$ км. Учитывая, что периодичность технического обслуживания РУ автомобилей ВАЗ на станциях ТО составляет 15 тыс. км, и она близка периодичности, полученной расчетным путем, принимаем ее в качестве искомой величины t_d .

При определении оптимальной периодичности диагностирования $t_d^{\text{опт}}$ можно выполнить и аналитическую минимизацию функции $C_{уд}$, если известны реализации всех составляющих выражения (8.19). Решение этого уравнения позволяет определить искомую оптимальную периодичность диагностирования конкретного объекта.

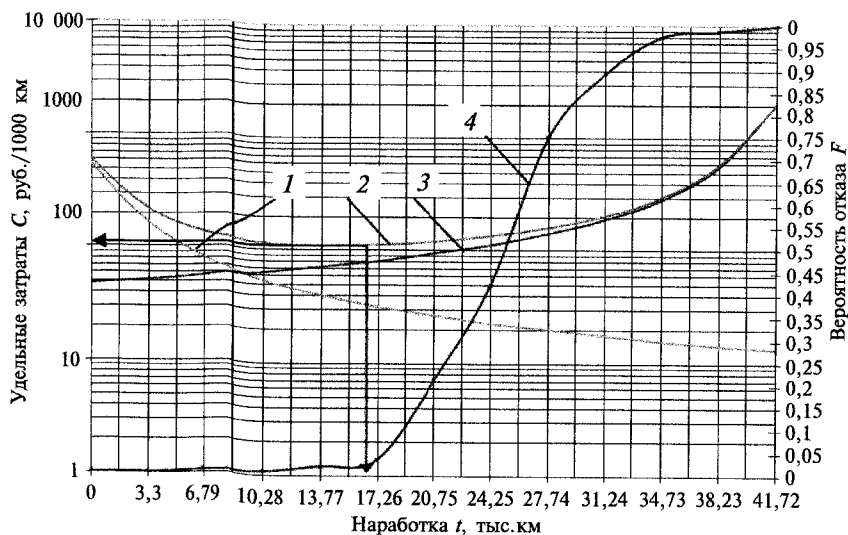


Рис. 8.20. Определение периодичности технических воздействий экономико-вероятностным методом:

1 — затраты на ТО и Д; 2 — суммарные затраты на ТО, Д и ТР; 3 — затраты на ТР; 4 — вероятность отказа

8.3.6. Управление техническим состоянием автомобилей на базе диагностической информации

Под управлением техническим состоянием объекта подразумевается комплекс технических воздействий, направленных на предупреждение отказов и восстановление значений параметров технического состояния до требуемого уровня.

Система управления техническим состоянием автомобилей базируется на достоверной информации о текущем состоянии элементов автомобилей, которая может быть получена только в процессе их диагностирования. На основе этой информации в производстве решаются следующие задачи:

- по данным фактических изменений параметров технического состояния элементов автомобиля устанавливаются периодичности ТО-1 и ТО-2;
- выявляется необходимый перечень и объем работ по ТО и ремонту;

- по параметрам технического состояния оценивается остаточный ресурс диагностируемых узлов и агрегатов и т. д.

Предварительное определение фактического объема работ ТО-2 на базе диагностической информации сокращает трудоемкость их выполнения по сравнению с нормативными значениями на 15—20 %. Диагностирование при выполнении ремонта позволяет выявить скрытые и нечетко выраженные отказы и неисправности, предупредить их возникновение, что существенно снижает простои автомобилей в ТР.

Функциональная схема управления производственными процессами ТО и ремонта автомобилей с диагностированием их технического состояния приведена на рис. 8.21. Исходные данные X_0 , вводимые в управляющую систему (УС), выдаются в виде необходимости проведения различных видов ТО или ремонта. Объем технических воздействий и перечень операций из-за вариации технических состояний автомобиля, обусловленных влиянием факторов внешней среды (ВС), уточняется с помощью средств диагностирования (СД). Результаты диагностирования в виде значений диагностических параметров X_i вводятся в управляющую систему.

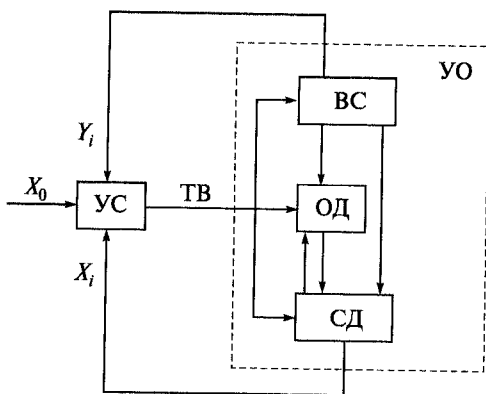


Рис. 8.21. Схема управления техническим состоянием объекта в эксплуатации: УС — управляющая система; ВС — внешняя среда; УО — управляемый объект; ОД — объект диагностирования; СД — средства диагностирования; ТВ — технические воздействия

Управляющая система (главный инженер, начальник производства) принимает решение о проведении необходимых технических воздействий (ТВ) по каждому конкретному автомобилю с целью до-

ведения конструктивных элементов автомобиля U_i до нормативных или близких к нему значений. Принятые в управляющей системе решения реализуются проведением необходимых операций ТО или ремонта.

Результативность выполненных технических воздействий проверяется подсистемой обратной связи сравнением диагностических параметров после выполнения ТО или ремонта с их нормативными значениями. Если полученные результаты соответствуют нормативным значениям, автомобиль считается технически исправным и направляется в эксплуатацию.

Таким образом, внедрение диагностирования в процесс управления техническим состоянием позволяет уточнить объемы регламентных работ применительно к управляемому объекту, исключить затраты на проведение преждевременных операций профилактических и ремонтных работ, сократить расходы запасных частей и материалов, оценить качество ремонтно-профилактических работ, полнее использовать заложенный в объект потенциальный ресурс. Отсутствие диагностирования в системе управления делает ее неуправляемой, разомкнутой.

Практика работы автотранспортных предприятий показывает, что в процессе поиска и уточнения неисправностей контролируемых узлов персонал, осуществляющий диагностирование технического состояния АТС, обрабатывает значительный поток информации. В таких условиях качество принимаемых решений по назначению комплекса ТВ во многом зависит от опыта и квалификации производственного персонала АТП.

Перспективным направлением повышения эффективности системы управления техническим состоянием объектов является автоматизация процессов принятия решений по поддержанию и восстановлению их работоспособности на базе компьютерных программ.

На автотранспортных предприятиях широко используются компьютерные программы, разработанные на базе стандартного пакета Microsoft Access, представляющего собой настольную систему управления базами данных (СУБД).

Типовое программное обеспечение системы управления техническим состоянием автомобилей включает следующее:

- базы данных автомобилей, нормативных значений диагностических параметров, деталей со средними наработками до отказа, ремонтных воздействий;

- результаты диагностирования;
- рекомендуемые технические воздействия.

На автотранспортных предприятиях База данных автомобилей формируется при их поступлении на диагностирование и постепенно расширяется по мере увеличения количества заездов транспортного средства на техническое обслуживание и ремонт (рис. 8.22).

№ авто	Модель	Гос. номер
3	GA3-33022	K-026-PA (33)
5	GA3-33022	M-012-AB (33)
6	GA3-33022	T-683-EM (33)

(Счетчик)

Рис. 8.22. База данных автомобилей

При использовании программы на станциях технического обслуживания автомобилей она создается по конкретным данным транспортных средств, обслуживаемых данной СТОА.

База данных диагностических параметров включает перечень диагностических параметров, принятых для оценки технического состояния агрегата, для которого установлены их нормативные значения, а также значения показателя степени α , характеризующего скорость изменения параметра по наработке. В качестве примера на рис. 8.23 приведена база данных диагностических параметров для оценки технического состояния кривошипно-шатунного механизма двигателя ЗМЗ-4063.10.

База данных деталей включает детали, повреждение которых при эксплуатации непосредственно влияет на значения диагностических параметров (рис. 8.24). Эта форма программы заполняется по результатам экспериментальных исследований эксплуатационной надежности деталей диагностируемого объекта.

База данных ремонтов содержит ремонтные воздействия, рекомендуемые для восстановления работоспособности диагностируемого объекта с указанием трудоемкости их проведения и примерной стоимости заменяемых деталей. На рис. 8.25 приведен фрагмент такой базы для двигателя ЗМЗ-4063.10.

Диагностические параметры: форма

База данных диагностических параметров

	Нормальное значение	Предельное значение	α
Давление в конце такта сжатия X(4-2):	12	9,6 кг/см ²	1,3
Значение относительных утечек воздуха при положении поршня в ВМТ X(4-3) в течение не менее 5 сек, диапазон с 1,5 до:	1	0,75 кг/см ²	1,6
Расход картерных газов при 4000 мин ⁻¹ X(4-14):	22	62 л/мин	1,5
Значение давления в главной масляной магистрали при 2500 мин ⁻¹ X(4-10):	5	3 кг/см ²	1,4
Значение давления в главной масляной магистрали при 700-800 мин ⁻¹ :		1,1 кг/см ²	
Средний зазор в верхней и нижней головках шатуна X(4-16):	0,0135	0,0725 мм	1,4

Рис. 8.23. База данных диагностических параметров

Детали: форма

База данных деталей

№ детали	Наименование	Среднее арифметическое значение, тыс. км	Среднее квадрат. отклонение, тыс. км
1	Кольца поршневые	148,17	45,116
2	Поршневая группа	191,617	35,276
3	Блок цилиндров с крышками подшипников	203,696	34,468
4	Клапан	119,021	34,798
5	Толкатель гидравлический	131,752	39,846
6	Направляющая втулка	154,568	34,005
7	Вал распределительный	194,953	26,757
8	Головка блока цилиндров	195,574	38,906
9	Вкладыш нижних головок шатунов	163,978	41,426
10	Вал коленчатый	198,361	39,216
11	Вкладыш подшипников коленчатого вала	166	40,558
12	Промежуточный вал	141,809	41,673
13	Поршневый палец	186,157	37,231
14	Втулка верхней головки шатуна	195,874	52,666

Рис. 8.24. База данных средних наработок деталей до отказа двигателя.

Наиболее важным разделом программы является база данных результатов диагностирования, которая содержит следующую информацию: модель автомобиля, его государственный номер, дату проведения контроля, пробег с начала эксплуатации, значения диагностических параметров (рис. 8.26). По мере формирования этой базы можно установить закономерности изменения диагностических параметров по наработке автомобиля.

Ремонты: форма

База данных ремонтов

№ ремонта	Наименование	Трудоемкость выполнения, чел.-ч. частей з/у	Стоимость зап. частей з/у
1	Замена поршневых колец	4,5	573,39
2	Замена поршневой группы с поршневыми кольцами	6,23	3734,41
3	Замена клапана с дефектовой	6,5	1203,94
4	Замена клапана с направляющей втулкой	5,93	865,24
5	Замена гидротолкателей	2,3	2386,71
6	Замена распределительных валов	2	2374,35
7	Ремонт головки блока цилиндров (клапана, направляющие втулки, гидротолк.)	7	6691,24
8	Капитальный ремонт двигателя	27,14	16522,66
9	Замена направляющих втулок	5,93	726,24
10	Замена вкладышей нижних галзовок шатунов	5,4	113,12
11	Замена вкладышей подшипников коленчатого вала	15,9	140,96
12	Замена вкладышей нижних головок шатунов и подшипников коленчатого вала	15,9	254,08
13	Замена коленчатого вала	16,6	2906,15
14	Замена коленчатого вала и вкладышей коленчатого вала	16,6	3160,23
15	Замена промежуточного вала	6	416,67
16	Замена втулки верхней головки шатуна	6,23	125,14
21	Замена поршневого пальца	6	36,44
77	Замена головки блока цилиндров	5	11884,32

Рис. 8.25. База данных ремонтных воздействий

Диагностика: форма

Диагностика автомобилей

Автомобиль: ГАЗ-3302

Автомобиль: ГАЗ-3302 Гос. номер: Т-680-ЕМ (33)

Дата	Время, мин	Давление в камере таблетки, кг/см ²	Температура втулки, °C	Жидкость расход, л/мин	Давление масла при 2000 об/мин	Давление масла при 700 об/мин	Давление в головке шатуна, мм
11.01	10	1,1	0,5	4	1	1	0,02
11.04.12	12	1,1	0,05	4	1	1	0,02
11.05.12	10	1,02	0,02	4	1	1,18	0,02

☐ Сохранить результаты
☐ Трудоемкость
☐ Стоимость
☐ Конфигурация дисков

Рис. 8.26. База данных результатов диагностирования

Результаты обработки текущих значений диагностических параметров выводятся на печать в виде протокола осмотра транспортного средства. Этот документ является сводным и включает следующую информацию: данные об автомобиле; значения диагностических параметров с учетом их изменения по наработке (базу данных техниче-

ского состояния); перечень рекомендуемых ремонтных воздействий (рис. 8.27).

Программа управления техническим состоянием предусматривает выполнение необходимых технических воздействий при выходе диагностических параметров за допустимые значения. В этом случае на экран монитора выводится рекомендуемый комплекс ремонтных операций.

Протокол осмотра автомобиля – 11.05.2012 г.

Данные по диагностируемому автомобилю:

Модель: ГАЗ-33022

Государственный номер: Т- 683-ЕМ (33)

Пробег с начала эксплуатации: 182 тыс. км

Результаты диагностирования за период наблюдения:

Дата проверки	Пробег, тыс. км	Давление в конце такта сжатия, кг/см ²	Утечка воздуха, кг/см ²	Расход картерных газов, л/мин	Давление масла при 2500 мин ⁻¹ , кг/см ²	Зазор в головке шатуна, мм
11.03.2012	150	11	0,9	30	4,5	0,02
11.04.2012	166	10,8	0,85	35	4,2	0,025
11.05.2012	182	10,5	0,82	38	4,0	0,03

Результаты текущего диагностирования:

- давление в конце такта сжатия **10,5 кг/см²**
- значение относительных утечек воздуха при положении поршня в ВМТ Х_{4.3} в течении не менее 5 с, снижение с 1,5 до **0,82 кг/см²**
- расход картерных газов при 4000 мин⁻¹ **38 л/мин**
- давления в главной масляной магистрали при 2500 мин⁻¹ **4 кг/см²**
- суммарный зазор в верхней и нижней головках шатуна **0,03 мм**

Рекомендации по техническим воздействиям:

- параметры не выходят за допустимые пределы

Рис. 8.27. Пример распечатки результатов диагностирования автомобиля

Выбор необходимых технических воздействий осуществляется согласно принципу, по которому должно быть обеспечено восстановление всех деталей и сопряжений, которые привели к тому, что параметры диагностирования превысили предельные значения. В табл. 8.7 приведен такой перечень для двигателя ЗМЗ-4063.10 по параметру относительной утечки воздуха при положении поршня в верхней мертвой точке.

Таблица 8.7. Перечень технических воздействий при выходе за предельное значение параметра «Относительная утечка воздуха»

№ п/п	Наименование ремонта	Трудоемкость, чел.-ч.	Стоимость заменяемых деталей, руб.
1	Замена поршневых колец	4,5	573,39
2	Замена поршневой группы с поршневыми кольцами	6,23	3734,41
3	Замена клапана	5,93	865,24
4	Замена клапана с направляющей втулкой	6,5	1203,94
5	Замена гидротолкателей	2,3	2386,71
6	Замена распределительного вала	2,0	2374,35
7	Ремонт головки блока цилиндров	7,0	6691,24
8	Замена головки блока цилиндров	5,0	11 884,32
9	Капитальный ремонт двигателя (снятие и установка)	27,14 (13,5)	16 522,66
10	Замена направляющих втулок	5,93	726,24

Аналогичным образом составлен перечень ремонтных воздействий и для других диагностических параметров при превышении ими предельных нормативных значений. В случае одновременного превышения нормативных значений нескольких диагностических параметров программа дает рекомендации по выполнению наиболее рациональных технических воздействий для восстановления утраченной работоспособности изделия.

Для восстановления ресурса двигателя, например, при выходе за допустимые пределы давления в конце такта сжатия, относительных

утечек воздуха при положении поршня в ВМТ и расхода картерных газов при 4000 мин^{-1} наиболее целесообразно использование ремонта с заменой поршневой группы и поршневых колец.

При превышении предельных значений таких диагностических параметров, как давление в главной масляной магистрали и суммарный зазор в верхней и нижней головках шатуна, может быть рекомендована замена (ремонт) коленчатого вала с вкладышами.

Внедрение разработанной системы управления техническим состоянием автомобилей в производственный процесс автотранспортного предприятия позволяет снизить трудоемкость и затраты на ремонт, минимизировать время простоев, уменьшить число полных разборок сложных агрегатов и полнее использовать их ресурс. Кроме того, на предприятии имеется четко отлаженная система получения достоверной информации о техническом состоянии каждого агрегата и закономерности их изменения по наработке.

Вопросы для самопроверки

1. Какие факторы оказывают влияние на показатели надежности автомобилей в эксплуатации?
2. Назовите основные методы обеспечения надежности автомобилей в эксплуатации.
3. Какие эксплуатационные материалы оказывают наиболее существенное влияние на надежность машин?
4. Для решения каких задач создана и функционирует планово-предупредительная система ТО и ремонта автомобилей?
5. Что понимается под стратегией ТО и ремонта автомобилей?
6. Перечислите основные способы оптимизации периодичностей технического обслуживания автомобилей.
7. Назовите основные виды ремонтов, используемых для восстановления работоспособности автомобилей.
8. Что понимается под «технической диагностикой» и «диагностированием» автомобилей?
9. Перечислите основные методы и средства диагностирования.
10. Что понимается под диагностическим параметром, оценивающим техническое состояние автомобилей?
11. Какие требования предъявляются к диагностическим параметрам?

12. Раскройте сущность нормирования диагностических параметров.
13. Как определяются предельные и допустимые значения диагностических параметров?
14. Что понимается под прогнозированием остаточного ресурса машин?
15. Перечислите методы определения оптимальной периодичности диагностирования автомобилей.
16. В чем состоит сущность управления техническим состоянием автомобилей на базе диагностической информации?
17. Что включает типовое программное обеспечение системы управления техническим состоянием автомобилей?

Заключение

В настоящем учебном пособии, рассчитанном на студентов специальностей «Автомобили и автомобильное хозяйство» и «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования», рассмотрены теоретические и практические вопросы основ теории надежности машин.

Раскрыты общие понятия науки о надежности, определения качества, основных свойств надежности, исправного, работоспособного и предельного состояний машин. Приведены классификация отказов автотранспортных средств, количественные показатели для оценки их безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также показатели для комплексной оценки нескольких свойств надежности одновременно.

Рассмотрены инженерно-физические основы надежности, устанавливающие основные причины потери машиной работоспособности (усталость металлов, остаточные деформации, старение, коррозия, изнашивание). Учитывая, что основной причиной отказа является изнашивание, в пособии достаточно внимания уделено его физической сущности и факторам, влияющим на износостойкость изделий. Приведены основные методы испытания автомобилей на надежность, а также различные способы их ускорения.

Порядок сбора и обработки статистической информации об отказах автомобилей, описываемых разными законами распределения, показан на конкретных примерах. Полученная после обработки информация о надежности позволяет выявить слабые места в конструкции автомобиля, разработать конкретные мероприятия по повышению их долговечности и рациональную систему поддержания автотранспортных средств в работоспособном состоянии.

Работы по созданию высоконадежных машин ведутся на всех этапах их конструирования, изготовления, испытаний и эксплуатации.

В пособии изложены современные методы обеспечения надежности автомобилей, начиная с этапа проектирования и заканчивая их эксплуатацией.

Приведенный в пособии материал отражает вопросы, недостаточно освещенные в ранее опубликованной учебной литературе по автомобильному транспорту, поэтому, несомненно, окажет помощь студентам высших учебных заведений, изучающим дисциплины «Основы теории надежности машин» и «Основы работоспособности технических систем».

Литература

1. *Авдонькин Ф.Н.* Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей. М.: Транспорт, 1985.
2. *Аринин И.Н.* Техническая эксплуатация автомобилей / С.И. Коновалов, Ю.В. Баженов. Ростов н/Д: Феникс, 2004.
3. *Баженов Ю.В.* Основы теории надежности машин: учеб. пособие. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006.
4. *Баженов Ю.В.* Проектирование предприятий автомобильного транспорта: практикум. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008.
5. *Безверхний С.Ф., Яценко Н.Н.* Основы технологии полигонных испытаний и сертификация автомобилей. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996.
6. *Болдин А.П., Сарбаев В.И.* Надежность и техническая диагностика подвижного состава автомобильного транспорта: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИИ, 2010.
7. *Гмурман В.Е.* Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистики: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1975.
8. ГОСТ 27002—89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990.
9. ГОСТ 27578—87. Техническая диагностика. Диагностирование изделий. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1988.
10. *Гоц А.Н.* Расчеты на прочность деталей ДВС при напряжениях, переменных во времени: учеб. пособие для вузов. М.: ФОРУМ, 2013.
11. *Гурвич И.Б., Сыркин П.Э.* Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей. М.: Транспорт, 1984.
12. *Димов Ю.В.* Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2004.
13. *Емелин М.И., Герасименко А.А.* Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации. М.: Машиностроение, 1980.

14. *Зорин В.А.* Основы работоспособности технических систем: учебник для вузов. М.: Магистр-Пресс, 2005.
15. *Зорин В.А.* Основы работоспособности технических систем: учебник для вузов. М.: Академия, 2009.
16. *Колесник П.А., Кланица В.С.* Материаловедение на автомобильном транспорте: учебник для вузов. М.: Академия, 2012.
17. *Кубарев А.И.* Надежность в машиностроении. М.: Изд-во стандартов, 1989.
18. *Кугель Р.В.* Испытания на надежность машин и их элементов. М.: Машиностроение, 1982.
19. *Кузьмин Н.А.* Техническая эксплуатация автомобилей: закономерности изменения работоспособности: учеб. пособие. М.: ФОРУМ, 2011.
20. *Малкин В.С.* Техническая эксплуатация автомобилей: Теоретические и практические аспекты: учеб. пособие. М.: Академия, 2007.
21. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. РД 50-690—89. М.: Изд-во стандартов, 1990.
22. *Мирошников Л.В., Болдин А.П., Пал В.И.* Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях. М.: Транспорт, 1977.
23. *Николаев Н.Н.* Основы теории надежности и диагностика: учеб. пособие. Волгоград: Изд-во ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2010.
24. *Озорнин С.П.* Основы работоспособности технических систем: учеб. пособие. Чита: Изд-во ЧитГУ, 2006.
25. *Павлов Е.В., Крюков А.Ф.* Надежность строительных и дорожных машин: учеб. пособие. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2005.
26. *Проников А.С.* Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978.
27. Российская автотранспортная энциклопедия: в 3 т. Т. 3. Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт автотранспортных средств: справ. и науч.-практ. пособие. М.: РООИП, 2000.
28. *Ротенберг Р.В.* Основы надежности системы водитель — автомобиль — дорога — среда. М.: Транспорт, 1986.
29. *Сергеев А.Г.* Метрология: учеб. пособие. М.: Университетская книга; Логос, 2009.
30. Справочник. Надежность в машиностроении / под общ. ред. В.В. Шашкина и Г.П. Карзова. СПб.: Политехника, 1992.

-
31. Сопротивление материалов: учебник для вузов / А.Г. Схиртладзе, Б.В. Романовский, В.В. Волков, А.Н. Потемкин. М.: Академия, 2012.
 32. Техническая эксплуатация автомобилей: учебник для вузов / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин и др. 4-е изд. М.: Наука, 2004.
 33. Технология автомобилестроения: учебник для вузов / А.Л. Карунин, Е.Н. Бузник, О.А. Дашенко и др.; под ред. О.А. Дашенко. М.: Трикста, 2005.
 34. *Яхьяев Н.Я., Кораблин А.В.* Основы теории надежности и диагностики: учебник для вузов. М.: Академия, 2009.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН	5
1.1. Общие понятия науки о надежности	5
1.2. Термины и определения в теории надежности	10
1.3. Количественные показатели надежности	21
1.4. Надежность парка автомобилей	32
Глава 2. ПРОЦЕССЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАШИН	40
2.1. Процессы изменения начальных свойств изделий	40
2.2. Эксплуатационное нагружение деталей машин	46
2.3. Причины нарушения работоспособности машин	51
Глава 3. ВИДЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ	92
3.1. Классификация видов изнашивания	92
3.2. Закономерности изнашивания деталей	102
3.3. Количественные характеристики процесса изнашивания	105
3.4. Предельные и допустимые износы	106
3.5. Методы измерения износа деталей и сопряжений	112
Глава 4. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ	122
4.1. Влияние на изнашивание давления и скорости относительного перемещения	122
4.2. Влияние на изнашивание температуры поверхности трения ...	124
4.3. Зависимость интенсивности изнашивания от вида трения	126
4.4. Влияние на изнашивание смазочных материалов	133
4.5. Зависимость интенсивности изнашивания от механических характеристик и структуры материалов деталей	143

4.6. Влияние на изнашивание качества поверхности детали	146
4.7. Влияние на изнашивание условий эксплуатации	153
Глава 5. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН	160
5.1. Оценка надежности машин с использованием структурных схем	161
5.2. Цель и виды испытаний автотранспортных средств	165
5.3. Дорожные испытания автомобилей на надежность	169
5.4. Стендовые испытания	178
5.5. Ускоренные испытания	180
5.6. Определение объема выборки испытаний	184
Глава 6. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН	189
6.1. Числовые характеристики случайных величин	189
6.2. Законы распределения случайных величин	190
6.3. Статистическая обработка информации о надежности	200
6.4. Обработка информации по результатам незавершенных испытаний	219
Глава 7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ	224
7.1. Конструктивные методы обеспечения надежности	226
7.2. Обеспечение надежности машин при их производстве	243
Глава 8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН В ЭКСПЛУАТАЦИИ	255
8.1. Факторы, влияющие на надежность машин в эксплуатации	255
8.2. Система технического обслуживания и ремонта машин	262
8.3. Техническая диагностика машин	275
Заключение	313
Литература	315

Баженов Юрий Васильевич

Основы теории надежности машин

Учебное издание

*Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 1 ст. 11 ФЗ № 436-ФЗ*

Выпускающий редактор *Г.Г. Семенова*
Корректор *Л.А. Шитова*
Компьютерная верстка *И.В. Кондратьевой*
Оформление серии *П.Е. Родькина*

Подписано в печать 20.02.2014. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 20,0. Уч.-изд. л. 20,7.
Бумага мелованная. Тираж 300 экз.
Заказ № 1156

Издательство «ФОРУМ»
101990, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-32-07, 625-52-43
E-mail: forum-knigi@mail.ru

Отдел продаж издательства «ФОРУМ»:

101990, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-52-43
E-mail: forum-ir@mail.ru
www.forum-books.ru

*Книги издательства «ФОРУМ»
вы также можете приобрести:*

Отдел продаж «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в
Тел.: (495) 380-05-40 (доб. 252)
Факс: (495) 363-92-12

Отдел «Книга-почтой»
E-mail: podpiska@infra-m.ru;
books@infra-m.ru

Отпечатано способом ролевой струйной печати
в ОАО «Первая Образцовая типография»
Филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1
Сайт: www.chpd.ru, E-mail: sales@chpd.ru,
8(495)988-63-76, т/ф. 8(496)726-54-10

ISBN 978-5-91134-883-0

