

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Ю. В. БАЖЕНОВ М. Ю. БАЖЕНОВ

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Допущено Федеральным УМО в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 23.00.00 – «Техника и технологии наземного транспорта» в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и «Технология транспортных процессов» уровня образования бакалавр и магистр; аспирантов, обучающихся по направлению «Техника и технология наземного транспорта», специальность «Эксплуатация автомобильного транспорта»



Владимир 2017

УДК 629.33.017
ББК 39.33-01
Б16

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой производства и ремонта автомобилей и дорожных машин
Московского автомобильно-дорожного государственного
технического университета (МАДИ)
В. А. Зорин

Доктор технических наук, профессор
профессор кафедры строительных и дорожных машин
Нижегородского государственного технического университета
им. Р. Е. Алексеева
Ю. И. Молев

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Баженов, Ю. В.
Б16 Основы надежности и работоспособности технических систем :
учеб. пособие / Ю. В. Баженов, М. Ю. Баженов ; Владим. гос. ун-т
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2017. – 267 с.
ISBN 978-5-9984-0785-7

Рассматриваются основные понятия надежности и работоспособности технических систем; причины изменения состояния систем в эксплуатации; факторы, определяющие интенсивность изнашивания, усталостного и коррозионного разрушения деталей машин; способы получения, обработки и анализа информации о надежности технических систем; методы обеспечения надежности и работоспособности технических систем на этапах проектирования, производства и в эксплуатации.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 23.03.03 – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов при изучении дисциплин «Основы работоспособности технических систем» и «Основы теории надежности». Пособие также будет полезным для магистрантов направления подготовки 23.04.03. Соответствует требованиям государственного образовательного стандарта указанных направлений.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 18. Ил. 98. Библиогр.: 29 назв.

УДК 629.33.017
ББК 39.33-01

ISBN 978-5-9984-0785-7

© ВлГУ, 2017

ВВЕДЕНИЕ

К современным техническим системам предъявляют высокие требования по надежности и работоспособности при выполнении ими заданных функций. При этом с усложнением техники, внедрением в ее структуру электроники, компьютерных технологий эти требования постоянно возрастают. В полной мере это относится и к такой сложной технической системе, как автомобиль. Усложнение автомобилей и усиление требований к ним привели к тому, что проблема повышения их эксплуатационной надежности приобрела огромное значение. Автотранспортная техника, не отвечающая высоким требованиям по надежности, уровню потребительских свойств, не имеет перспектив в условиях острой конкуренции аналогичной продукции. ненадежный автомобиль не может эффективно функционировать, так как каждый его отказ влечет за собой значительные материальные потери, а нередко приводит и к дорожно-транспортным происшествиям.

Приоритетное значение надежности автотранспортных средств подтверждается статистическими данными, свидетельствующими о том, что расходы на поддержание их в работоспособном состоянии непрерывно растут. Суммарные ежегодные потери, связанные с обслуживанием и ремонтом машин различного назначения за период эксплуатации, в несколько раз превышают их первоначальную стоимость.

Для предупреждения отказов необходимо знать причины их возникновения и проявления, закономерности изменения технического состояния объекта, а также влияние, которое они оказывают на его работоспособность. В основном, если не учитывать нарушений норм проектирования и эксплуатации или неблагоприятных воздействий случайных внешних факторов, подавляющее большинство объектов достигают предельного состояния из-за износа или усталостного разрушения конструктивных элементов. В связи с этим выявление физических процессов изнашивания и усталостного разрушения, установление зависимостей физико-механических свойств поверхностного слоя детали от режима ее работы, факторов внешней среды позволяют управлять этими процессами, снижать их интенсивность.

Решение проблемы повышения надежности технических систем должно базироваться на достоверной информации по их отказам и неисправностям, фактическим ресурсам, трудоемкостям обслуживания и ремонта, а также факторам, влияющим на эти показатели в реальных условиях эксплуатации. Наиболее объективную и исчерпывающую информацию о надежности автомобилей дают эксплуатационные испытания, которые проводят в типичных условиях работы автотранспортных предприятий. 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.

Поддержание автомобилей в работоспособном состоянии обеспечивается *системой технического обслуживания*, включающей в себя комплекс контрольно-диагностических и профилактических мероприятий, выполнение которых позволяет минимизировать вероятность возникновения отказов в эксплуатации. Важный элемент этой системы – *техническая диагностика*, предоставляющая индивидуальную информацию о техническом состоянии как автомобиля в целом, так и его отдельных элементов.

Техническая диагностика как научное направление непосредственно связана с теорией надежности. Она обосновывает методы и средства периодической проверки надежности и работоспособности автомобилей, оценивает соответствие параметров технического состояния их нормативным значениям, выявляет потребность в выполнении необходимых операций ТО и ремонта. Диагностирование является качественно более совершенной формой контрольных работ, так как позволяет определять техническое состояние сложных объектов без их разборки и прогнозировать запас его исправной работы (остаточный ресурс).

Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса объекта позволяет не только предупреждать его возможные отказы, но и более обоснованно планировать режимы эксплуатации и профилактические мероприятия. Поэтому прогнозирование остаточного ресурса можно рассматривать как один из важных элементов системы управления процессами эксплуатации и технического обслуживания.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Общие понятия о надежности и работоспособности

Техническая система – это совокупность упорядоченно взаимодействующих между собой элементов, образующих единое техническое устройство, предназначенное для самостоятельного выполнения определенных функций.

Практически любой объект, машина, агрегат, узел, представляющий собой функционально завершенное изделие, является технической системой. Автомобиль, например, как сложная техническая система выполняет функции по перевозке грузов или пассажиров, карданная передача передает крутящий момент от одного механизма к другому, генератор преобразует механическую энергию, получаемую от двигателя, в электрическую.

Техническая система включает в себя взаимосвязанные между собой *элементы*, которые в свою очередь в зависимости от степени функциональной завершенности могут выполнять свои заданные функции или же составлять ее элементарные неделимые в конструкторском плане части (детали). Двигатель, например, является элементом такой сложной технической системы, как автомобиль. С другой стороны, двигатель выполняет свои функции (преобразует тепловую энергию сгорающего в его цилиндрах топлива в механическую), поэтому он также является технической системой. Детали же двигателя (блок цилиндров, головка блока, коленчатый и распределительные валы, поршни, поршневые кольца) – его конструктивные элементы.

Несмотря на огромное разнообразие технических систем по функциональному назначению, конструкторской и технологической завершенности, они обладают рядом общих свойств:

- *технические системы* состоят из элементов (частей), то есть имеют структуру;
- *элементы (части) технической системы* соединены между собой определенным образом;
- *технические системы* созданы для выполнения определенных полезных функций.

Вместе с тем каждая техническая система обладает каким-либо своим, особым качеством, отличающим ее от других систем. В соответствии с ГОСТ 15467-79 под **качеством** изделия понимается совокупность свойств, обуславливающих его пригодность для выполнения им своего функционального назначения.

Применительно к автомобилям основные свойства, характеризующие их качество, – надежность, безопасность, динамичность, производительность, топливная экономичность и др. Каждое из этих свойств оценивается одним или несколькими выходными *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. 1.1.

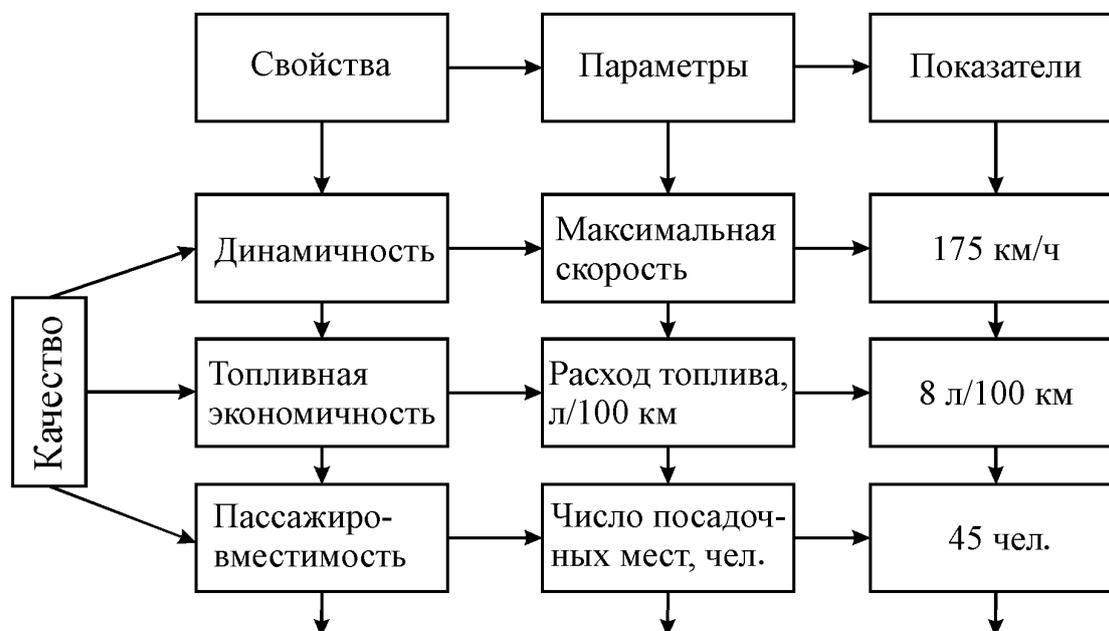


Рис. 1.1. Структура понятия качества автомобиля

Важнейшее свойство любого изделия, позволяющее количественно оценить изменение показателей качества во времени, – надежность. **Надёжность** – это свойство любого изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования (ГОСТ 27.002-89).

В современной технической 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 грамотно 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.

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.

Особенность проблемы надёжности – её связь со всеми этапами проектирования, изготовления и эксплуатации объекта, начиная с момента, когда формируется и обосновывается идея его создания, и заканчивая принятием решения о списании.

Надёжность машины закладывается **при ее проектировании и расчёте**. 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 надёжности, 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 испытаний изделий по параметрам надежности и других элементов процесса изготовления.

При эксплуатации машины заложенная при проектировании и производстве надёжность 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 надёжности является комплексной проблемой, так как непосредственным образом связана со всеми стадиями жизненного цикла машины – конструированием, изготовлением и эксплуатацией. Поэтому для решения задач, стоящих перед нею, привлекаются различные отрасли знаний.

В процессе эксплуатации под влиянием большого числа факторов происходит изменение свойств машин, определяющих их качество. Наука о надёжности изучает закономерности этих изменений и разрабатывает методы, обеспечивающие необходимый ресурс и безотказность работы машин при минимальных трудовых и материальных затратах.

Вопросы, решаемые наукой о надёжности, имеют свои специфические особенности, которые отличают ее от других отраслей знаний. Эти особенности заключаются в том, что:

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

Основная проблема обеспечения надёжности как раз и связана с прогнозированием поведения машины в зависимости от предполагаемых условий ее эксплуатации. При этом весьма важно оценивать (прогнозировать) параметры надёжности уже на ранних стадиях создания машины (расчеты при проектировании и конструировании).

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

Наука о надёжности изучает изменение показателей качества машин под влиянием тех факторов, которые приводят только к абсолютным изменениям её свойств. Она базируется на двух отраслях знаний – «математических методах теории надёжности» и «физике отказов».

Первые исследования в области надёжности 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 в объективной оценке параметров надёжности, 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 надёжности** основываются на теории вероятностей и математической статистике, а также смежных с ними дисциплинах.

Развитие математических методов теории надёжности 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 надёжности 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 возможным стало не только математически описать процессы изменения технического состояния изделий, но и объективно оценить влияние различных факторов на характер протекания этих процессов.

Поэтому второй теоретической основой науки о надёжности являются результаты исследования естественных наук, изучающих физико-химические процессы разрушения, старения и изменения свойств материалов, из которых изготовлены машины или которые необходимы для их функционирования (топлива, смазки и другие материалы). Исследование этих процессов во времени или по наработке – база для решения основных задач надёжности.

1.1.1. Классификация объектов и их состояний в эксплуатации

В теории надёжности термин «объект» используется в качестве наиболее общего наименования технической системы 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 или не предусмотрены нормативно-технической и (или) конструкторской документацией для данных объектов операции технического обслуживания, они подразделяются на *обслуживаемые* и *необслуживаемые*. В зависимости от того, предусмотрены ли для объектов операции ремонта, они подразделяются на *ремонтируемые* и *неремонтируемые*. В соответствии с возможностью восстановления утраченного в процессе эксплуатации работоспособного состояния объекты подразделяются на *восстанавливаемые* и *невосстанавливаемые*.

Восстанавливаемыми называют такие объекты, для которых восстановление работоспособного состояния предусмотрено нормативно-технической и (или) конструкторской документацией. Такие объекты после проведения необходимых ремонтных операций продолжают выполнять свои функции. Типичные примеры восстанавливаемых объектов – двигатели внутреннего сгорания, коробки передач, сцепления и

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

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

Большинство технических систем автомобилестроения (ходовая часть, трансмиссия, электрооборудование и др.) относятся к восстанавливаемым системам. При этом, если при ремонте объекта, двигателя, например, отказавшие элементы заменяются (топливные форсунки, свечи зажигания и т.п.), то двигатель является восстанавливаемым объектом, а заменяемые отказавшие элементы – невосстанавливаемыми.

В процессе эксплуатации показатели технических систем, характеризующие их качество, изменяются. Соответственно изменяется и состояние системы, которое определяется совокупностью текущих значений их конструктивных параметров.

Таковыми параметрами систем автотранспортной техники могут быть:

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

Основные причины изменения значений конструктивных параметров и соответственно технического состояния при эксплуатации – нагрузки, действующие на конструктивные элементы, взаимное перемещение этих элементов, воздействие тепловой, химической и электрической энергии, воздействие внешней среды и др.

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

Исправное состояние – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Поддержание исправного состояния объекта безусловно требует определённых эксплуатационных затрат на выполнение предусмотренных работ по техническому обслуживанию и ремонту, включая контроль и диагностику.

Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической или конструкторской документации, называется **неисправным состоянием** (неисправностью). Переход объекта из исправного состояния в неисправное происходит вследствие какого-либо повреждения, при этом он может сохранять свою работоспособность.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором он удовлетворяет тем требованиям нормативно-технической или конструкторской документации, выполнение которых обеспечивает его нормальное использование по назначению. Нормативно-техническая и конструкторская документация предусматривает уровень внешних воздействий на объект, методы ТО и ремонта, затраты на ремонт, нормы и допустимые отклонения от установленных параметров.

Неработоспособным называется состояние, при котором объект 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 возникшие повреждения не препятствуют его применению по назначению (например, помято крыло автомобиля, отслоилось лакокрасочное покрытие кузова и др.).

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 быть следствием неустранимого нарушения требований безопасности, неустранимого ухода заданных параметров (параметра) за установленные пределы, неустранимого снижения эффективности эксплуатации, быть вызвана необходимостью 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 определённые закономерности, изучаемые в теории надёжности.

1.1.2. Отказы технических систем и их классификация

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 под **отказом** понимается полная или частичная потеря технической системой работоспособности. При наступлении отказа система не может выполнять заданные функции или параметры ее технического состояния выходят за допустимые пределы.

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

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

В отличие от отказа под **повреждением** понимается событие, заключающееся в нарушении объектом исправности при сохранении им работоспособного состояния. При эксплуатации машин несвоевременное выявление и устранение повреждений может привести к отказу. Например, развитие таких повреждений, как мелкие трещины, небольшие деформации, потертости изоляции, нарушения регулировок, в случае их несвоевременного устранения приводят к нарушению функционирования, т.е. потере работоспособности.

Для предупреждения отказов необходимо знать причины их возникновения и проявления, закономерности изменения технического состояния объекта, а также влияние, которое они оказывают на его работоспособность. В табл. 1.1 приведена классификация основных отказов автомобилей в зависимости от этих факторов.

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 объекта (неудачно выполнена конструктивная схема, наличие в конструктивных элементах концентраторов напряжений, не учтены условия эксплуатации, незащищенность узлов трения от попадания абразивов и влаги и др.).

Таблица 1.1. Классификация отказов

Классификационный признак	Вид отказа
Источник и причина возникновения	Конструктивный Производственный Эксплуатационный Деградационный
Характер изменения параметра технического состояния	Постепенный Внезапный
Наличие внешнего проявления	Явный Скрытый
Взаимосвязь между отказами	Зависимый Независимый
Последствия отказа	Функционирования Параметрический

Производственные отказы возникают из-за нарушений технологических процессов изготовления деталей, узлов и агрегатов или их ремонта. Это могут быть различные отклонения размеров детали от заданных чертежом, дефекты при получении заготовок, погрешности механической обработки, 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 периодичностей технического обслуживания, использование некачественных эксплуатационных материалов, невысокая квалификация производственно-технического персонала могут привести к преждевременным отказам.

Деградационные отказы обусловлены 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 технической системы. Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени (наработки) от t_1 до t_2 зависит от длительности предыдущей работы (рис. 1.2, а).

Чем больше наработка автомобиля, тем выше вероятность возникновения отказа

$$F(t_2 + \Delta t) > F(t_1 + \Delta t) \text{ при } t_2 > t_1. \quad (1.1)$$

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.

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

Такой отказ возникает через некоторую наработку t (рис. 1.2, б), которая является случайной величиной и вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода от t_1 до t_2 не зависит от длительности предыдущей эксплуатации, т.е.

$$F(t_2 + \Delta t) \approx F(t_1 + \Delta t) \text{ при } t_2 > t_1. \quad (1.2)$$

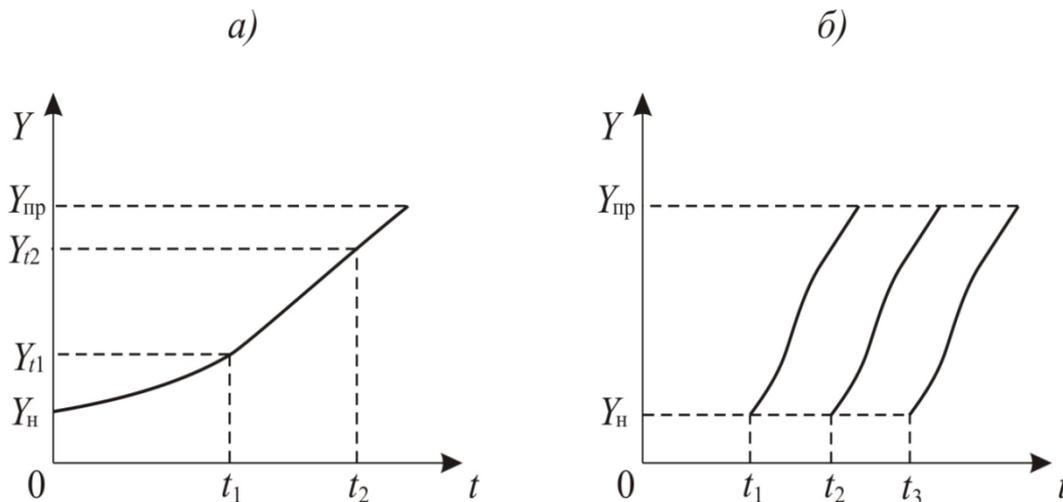


Рис. 1.2. Изменение параметра технического состояния Y по наработке t при постепенных (а) и внезапных (б) отказах:
 $Y_n, Y_{пр}$ – начальное и предельное значения параметров

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 твёрдость, 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 объект не может выполнять свои функции. Например, в результате отказа системы питания или зажигания двигатель не заводится, насос не подаёт масло и т.д.

Параметрические – отказы, приводящие 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.

1.1.3. Свойства надежности технических систем

Надёжность 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 характеризует свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Это свойство определяет непрерывную работу объекта без каких-либо вмешательств, направленных на поддержание его работоспособности, т.е. технических обслуживаний и ремонтов.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Таким образом, долговечность анализирует работу объекта в течение всего периода эксплуатации и учитывает, что его длительная работа невозможна без проведения необходимых профилактических и ремонтных мероприятий.

Ремонтопригодность – свойство объекта, определяющее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонта. Это свойство характеризует, с одной стороны, качество конструкторских решений по предупреждению и обнаружению возможных отказов и, с другой, какой ценой по трудозатратам обеспечивается требуемый уровень надёжности изделия. В технической эксплуатации автомобилей под ремонтнопригодностью (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.

1.2. Количественные показатели свойств надёжности

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 для оценки надёжности применяются количественные показатели её отдельных свойств (безотказности, долговечности, ремонтнопригодности и сохраняемости), а также комплексные показатели, характеризующие готовность и эффективность использования изделий. Показатели надёжности количественно характеризуют, в какой степени конкретному изделию присущи определённые свойства, обуславливающие его надёжность. Они могут

иметь размерность (например, наработка на отказ в тысячах километров) или не иметь её (вероятность безотказной работы, коэффициент технического использования и т.д.).

1.2.1. Показатели безотказности

Для количественной оценки безотказности технических систем используются следующие показатели:

- вероятность безотказной работы;
- средняя наработка на отказ;
- средняя наработка до отказа;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов.

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникнет. Данный 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 быть в пределах заданной величины.

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

$$0 \leq P(t) \leq 1. \quad (1.3)$$

Физический смысл $P(t)$ заключается в следующем. Если $P(t)$ какого-либо изделия (автомобиля, например) на наработке $t = 0 - 50$ тыс. км равна 0,95, это означает, что из большого их количества в среднем около 5 % потеряют свою работоспособность на этой наработке. 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 заданную наработку.

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

$$P(t) + F(t) = 1. \quad (1.4)$$

С увеличением наработки объекта вероятность его безотказной работы уменьшается и соответственно увеличивается вероятность отказа (рис. 1.3).

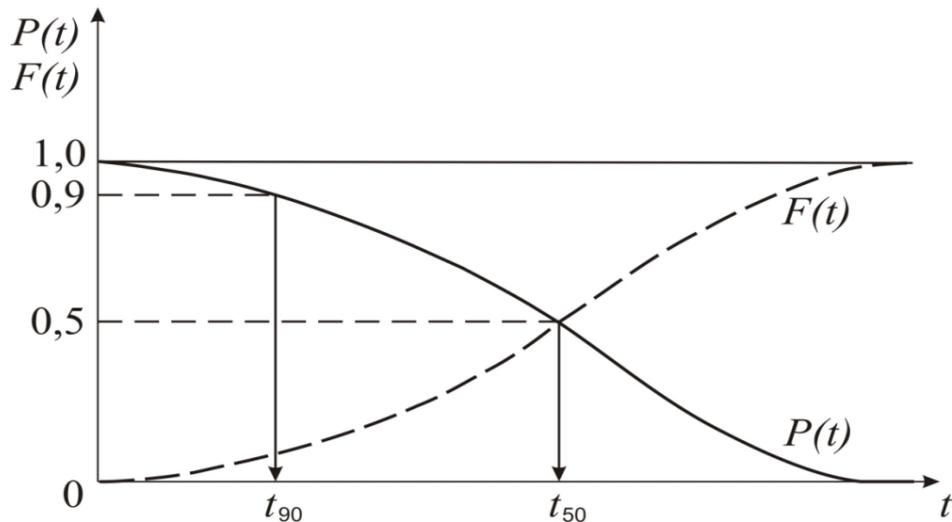


Рис. 1.3. Изменение вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$ по наработке

Функция $P(t)$ позволяет применительно к отдельно взятому изделию предвидеть и количественно оценить возможность его отказа на той или иной наработке. Она определяется из выражения

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt, \quad (1.5)$$

где $f(t)$ – плотность вероятности распределения наработок 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 :

$$\bar{P}(t) = \frac{N - \sum_{j=1}^r m_j}{N}, \quad (1.6)$$

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

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{T}{n}, \quad (1.7)$$

где t_1, t_2, \dots, t_n – наработки изделия между отказами; T – суммарная наработка изделия за время испытаний; n – число 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

$$\bar{t} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_r t_r}{m_1 + m_2 + \dots + m_r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r m_j t_j, \quad (1.8)$$

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 объекта до первого отказа. Статистическая оценка этого показателя определяется отношением суммы наработок испытуемых изделий до первого отказа к их количеству. Если довести испытания до момента, когда все испытуемые изделия отказали, то средняя наработка до отказа определяется по формуле

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j, \quad (1.9)$$

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:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t}. \quad (1.10)$$

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

$$P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t)\Delta t, \quad (1.11)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $f(t)$ – плотность распределения наработок до отказа.

Тогда интенсивность отказов определяется отношением

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (1.12)$$

Из этого выражения следует, что достаточно знать одну из трех функций $\lambda(t)$, $f(t)$ или $P(t)$, тогда по формулам (1.11) и (1.12) можно определить две другие. Графическая интерпретация изменения интенсивности отказов $\lambda(t)$ и плотности вероятностей $f(t)$ показана на рис. 1.4. На первом участке (периоде приработки) отказы объекта, возникновение которых обусловлено дефектами производства, имеют повышенную интенсивность. К началу второго 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.

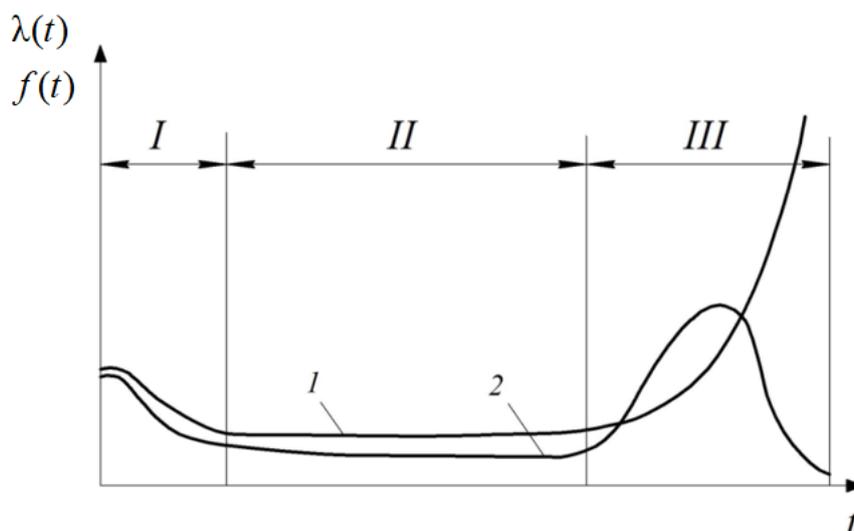


Рис. 1.4. Типичные зависимости интенсивности отказов $\lambda(t)$ – 1 и плотности вероятностей $f(t)$ – 2 по наработке t

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

Как следует из рисунка, кривая плотности вероятности отказов $f(t)$ до какой-то 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

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (1.13)$$

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

Из выражения (1.13) 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

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{m(t + \Delta t) - m(t)\}}{\Delta t}, \quad (1.14)$$

где Δt – малый интервал наработки; $m(t)$ – число отказов, наступивших до достижения наработки t ; $m(t + \Delta t) - m(t)$ – число отказов на интервале Δt .

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

$$\bar{\omega} = \frac{m(t_2) - m(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (1.15)$$

По сравнению с формулой (1.14) здесь рассматривается число отказов за конечный отрезок времени (t_1, t_2) при $t_1 \leq t \leq t_2$.

Ресурсные испытания и наблюдения за большими выборками объектов показывают, что в большинстве случаев изменение параметра потока отказов $\omega(t)$ протекает во времени или по наработке не монотонно, а примерно так же, как и интенсивность отказов $\lambda(t)$ (рис. 1.5). На участке I вначале происходит нарастание потока отказов, которое связано с потерей работоспособности деталей и узлов, имеющих дефекты изготовления и сборки (участок приработки). Затем параметр

потока снижается и на участке *II* до наработки t_2 (участке нормальной эксплуатации) является примерно постоянным.

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.

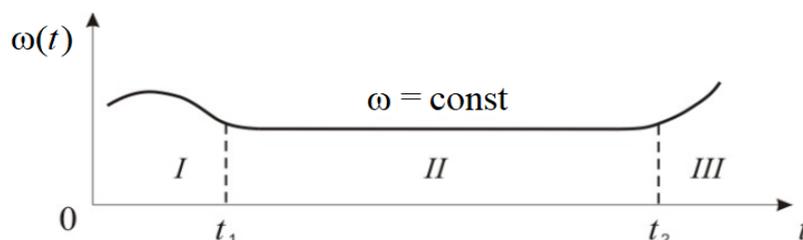


Рис. 1.5. Изменение параметра потока отказов ω по наработке t

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

$$m_{\text{cp}}(t) = \omega(t)\bar{t}. \quad (1.16)$$

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

$$\bar{t} = \frac{1}{\omega(t)} = \text{const}. \quad (1.17)$$

Следовательно, наработка на отказ и параметр потока отказов при условии его постоянства являются обратными величинами.

1.2.2. Показатели долговечности

Для оценки долговечности технических систем используют следующие основные 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.

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 производства и условиями эксплуатации. В связи с этим и ресурс, и срок службы являются случайными величинами.

По результатам статистической обработки данных, получаемых при испытаниях или эксплуатации, средний ресурс определяется по формуле

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad (1.18)$$

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, если известны кривая вероятности безотказной работы $P(t)$ или плотность распределения наработок до отказа $f(t)$ (рис. 1.6).

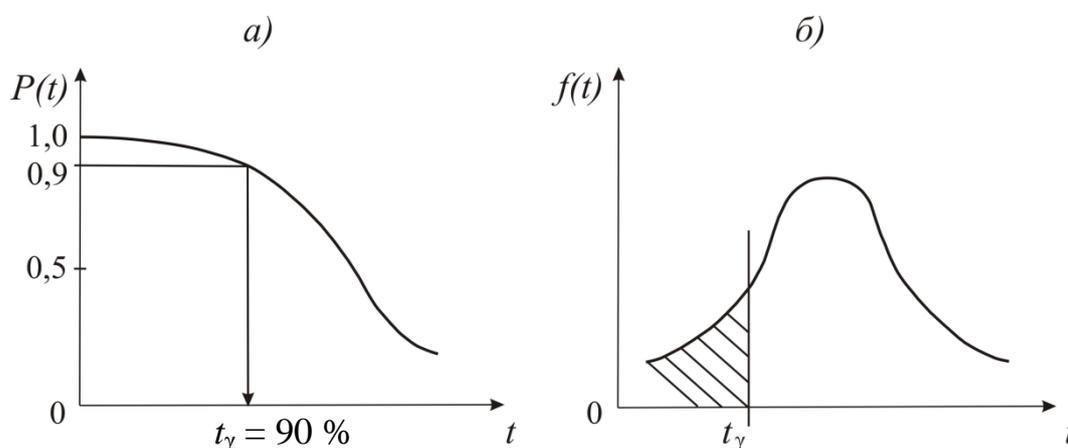


Рис. 1.6. Схема определения γ -процентного ресурса

Для этого через точку $P(t) = \gamma$ (рис 1.6, а) 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. 1.6, 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

$$1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{\gamma} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (1.19)$$

1.2.3. Показатели ремонтпригодности

Для оценки ремонтпригодности изделий служат следующие основные показатели:

- вероятность восстановления;
- среднее время восстановления;
- средняя трудоемкость восстановления.

Вероятность восстановления – это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта t_B не превысит заданное нормативной документацией значение t_H , т.е. $P(t_B) \leq P(t_H)$.

Среднее время восстановления – это математическое ожидание времени восстановления работоспособности изделия, вызванное отказом. По существу, этот 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

$$\bar{t}_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i, \quad (1.20)$$

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 (1.20), только вместо времени восстановления подставляется трудоемкость в человеко-часах.

Показатели ремонтпригодности, как нетрудно заметить, сводятся к оценке простоев машин в технических обслуживаниях и ремонтах, а также затрат на их выполнение. Зависят они от удобства доступа к объектам ремонта и обслуживания, легкоъемности конструктивных элементов, степени их взаимозаменяемости и унификации, контролепригодности и др.

1.2.4. Показатели сохраняемости

Сохраняемость технических систем 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 объекта, которая будет достигнута им с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

В процессе хранения или транспортирования на большие расстояния объекты могут подвергаться неблагоприятным воздействиям внешней среды (влажного воздуха, колебаниям температуры, вибрациям и т.д.). В результате объект может потерять свою работоспособность. Показатели сохраняемости оценивают способность объекта противостоят отрицательному воздействию внешней среды в условиях продолжительного хранения или транспортировки. При соблюдении технологии хранения и консервации изделия должны отвечать всем требованиям, предъявляемым к ним техническими условиями после обусловленного срока хранения. Например, если 90%-й срок сохраняемости изделия равен двум годам, то после этого срока хранения 90 изделий из 100 будут полностью соответствовать требованиям технической документации.

1.2.5. 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_{Γ} – это вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени в периодах между плановыми профилактическими мероприятиями:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum t_{pc}}{\sum t_{\Sigma}} = \frac{\sum t_{pc}}{\sum t_{pc} + \sum t_p}, \quad (1.21)$$

где $\sum t_{\Sigma}$ – суммарное время эксплуатации изделия в интервале наработки между плановыми ТО; $\sum t_{pc}$; $\sum t_p$ – суммарное время пребывания изделия в работоспособном состоянии и ремонте за этот же период.

Коэффициент K_{Γ} оценивает непредусмотренные остановки объекта на устранение отказов в периоды между техническими обслуживаниями, которые свидетельствуют о том, что профилактические операции ТО не в полной мере выполняют свою роль.

Коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и состоянии простоя, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период:

$$K_{ТИ} = \frac{\sum t_{pc}}{\sum t_{pc} + \sum t_p + \sum t_{то}}, \quad (1.22)$$

где $\sum t_{то}$ – суммарное время нахождения объекта в технических обслуживаниях.

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

1.3. Оценка надежности автомобильного парка

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.

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

1. Автомобиль является изделием, обладающим конечным ресурсом, в то время 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. Ограниченный простой отдельно взятого автомобиля практически не сказывается на его надежности, в то время как для АП простой даже работоспособного автомобиля рассматривается как частичный отказ.

Надежность среднесписочного автомобиля с достаточной степенью точности характеризует **коэффициент технической готовности** α_T :

$$\alpha_T = \frac{D_{\text{Э}}}{D_{\text{Э}} + D_{\text{Р}}}, \quad (1.23)$$

где $D_{\text{Э}}$, – суммарное количество дней пребывания автомобиля в эксплуатации; $D_{\text{Р}}$ – суммарное количество дней простоя автомобиля в ТО и ремонте.

Для парка подвижного состава коэффициент технической готовности α_T представляет собой отношение количества автомобиле-дней

пребывания автомобилей в эксплуатации $AD_{\text{э}}$ к суммарному количеству календарных автомобиле-дней $AD_{\text{и}}$ (автомобиле-дней в эксплуатации и автомобиле-дней в ТО и ремонте):

$$\alpha_{\text{т}} = \frac{AD_{\text{э}}}{AD_{\text{и}}} = \frac{AD_{\text{э}}}{AD_{\text{э}} + AD_{\text{р}}}. \quad (1.24)$$

Обобщенной оценкой степени использования парка автомобилей за период $D_{\text{и}}$ служит **коэффициент выпуска подвижного состава на линию** $\alpha_{\text{в}}$:

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{AD_{\text{э}}}{AD_{\text{э}} + AD_{\text{р}} + AD_{\text{н}}}, \quad (1.25)$$

где $AD_{\text{н}}$ – число автомобиле-дней нормированных простоев, а также простоев из-за отсутствия работы, персонала и др.

Разница между $\alpha_{\text{т}}$ и $\alpha_{\text{в}}$ обусловлена преимущественно простоями автомобилей по организационно-техническим и организационным причинам.

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 разбить 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, с болезнями, отпусками 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. 1.7. В соответствии с графиком производственного процесса автомобили 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 автомобили простаивают в ожидании соответствующих

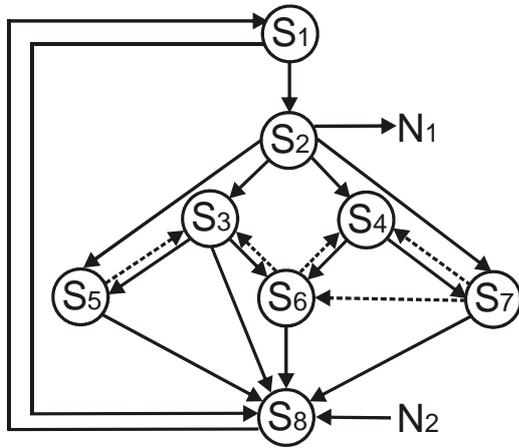


Рис. 1.7. Обобщенный граф возможных состояний автомобилей

технических воздействий (состояние S_2), а исправные автомобили направляются в зону хранения (состояние S_8).

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, имитационного 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.

В реальных условиях эксплуатации автопарка число автомобилей и продолжительность их пребывания в том или ином состоянии – величины случайные, зависящие от многих факторов. Однако, используя статистические данные результатов работы автотранспортного пред-

приятия за определенный период времени, можно установить закономерности распределения этих случайных величин и характеристики надежности АП. Для этого с помощью методов математической статистики и теории вероятностей осуществляют переход от статистических характеристик к теоретическим.

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. 1.2).

На основе данных табл. 1.2 о списочном количестве, выпуске на линию, простоях по различным причинам построим граф состояний автомобиля (рис. 1.8).

Граф включает в себя 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, соответствующих 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 $\alpha_{\text{т}}$.

Таблица 1.2. 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
354	285	5	49	9	6
354	289	5	46	9	5
354	279	5	53	10	7

Окончание табл. 1.2

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

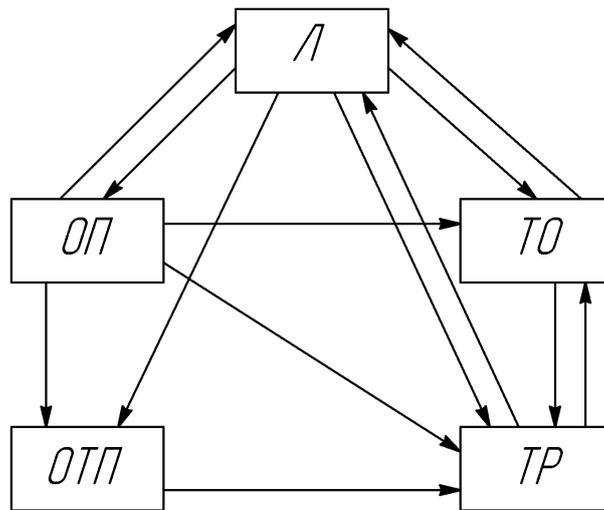


Рис. 1.8. Граф состояний автомобилей в АТП

Результаты обработки статистических данных работы АП представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. 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. Раскройте понятия качества, надежности и работоспособности технических систем.
2. Какие проблемы изучает наука о надежности?
3. На каких отраслях знаний базируется наука о надежности?
4. Какие виды технических состояний составляют жизненный цикл машин?
5. Приведите классификацию отказов.
6. В чем состоит основное отличие постепенных отказов от внезапных?
7. Какими свойствами характеризуется надежность изделий?
8. Что понимают под безотказностью технических систем и какими показателями оценивается это свойство надежности?
9. Раскройте понятие долговечности изделий. Какие показатели служат для ее оценки?
10. Укажите взаимосвязь между вероятностью безотказной работы $P(t)$, вероятностью отказов $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$.
11. Что понимают под гамма-процентным ресурсом объекта и как он определяется?
12. Что такое ремонтпригодность? Какие показатели служат для ее оценки?
13. Раскройте понятие сохраняемости. Какими показателями можно оценить это свойство надежности?
14. Какие показатели используются для комплексной оценки надежности технических систем?
15. Какими показателями можно оценить надежность парка автомобилей?
16. Приведите методику оценки показателей надежности автопарка по статистическим данным.

Глава 2

ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

При эксплуатации технических систем в них непрерывно протекают различные физико-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 конструктивных элементов и системы в целом. Поэтому изучение закономерностей, описывающих процессы изменения свойств и состояния материалов, является основой для повышения надежности технических систем и обеспечения их работоспособного состояния в эксплуатации.

2.1. Процессы изменения свойств и состояния конструктивных элементов технических систем

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

Основная причина протекания таких процессов – 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.

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, действующая на машину в процессе ее эксплуатации.



Рис. 2.1. Схема формирования процесса реализации машинной работоспособности

Часть этой энергии расходуется на совершение полезной работы машины, а часть вызывает в ее узлах и деталях различные физико-химические процессы (механические, тепловые, химические, электрические), вызывающие изменение их начальных свойств, различного рода повреждения и как следствие потерю работоспособного состояния.

Механические процессы возникают в машине в результате преобразования потребляемых источников энергии и воздействуют на конструктивные элементы машины в виде силовых нагрузок. Характер возникающих нагрузок определяется режимами рабочих процессов, 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 не только в результате приложения силовой нагрузки, но и в результате 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**. Результат взаимодействия сопряженных деталей при трении – их изнашивание, проявляющееся в виде отделения или деформации материала с поверхностей контактирующих деталей.

Изнашивание – одна из основных причин возникновения отказов и наиболее характерный вид 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.

Тепловые процессы возникают в конструктивных элементах технических систем 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 °С, 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. Механизм образования такого вида напряжения представлен на схеме рис. 2.2.

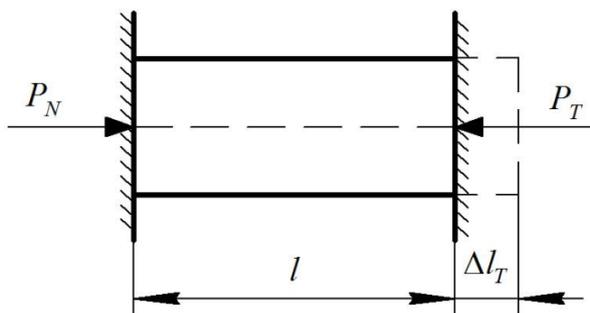


Рис. 2.2. Схема возникновения температурного напряжения детали

Механизм образования такого вида напряжения представлен на схеме рис. 2.2.

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_H определяется из выражения

$$\sigma_H = k_T E \Delta T, \quad (2.3)$$

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 k_T и модуля продольной упругости E .

Химические процессы наблюдаются при взаимодействии материалов конструктивных элементов машин с агрессивными компонентами внешней среды (влажностью, 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 содержат в своем составе кислоту, которая попадает в атмосферу с оксидами азота и серы, образующихся в огромных объемах при сгорании различных источников энергии.

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

Электрические процессы протекают, прежде всего, в машинах, оборудованных электрическими и электронными системами управле-

ния их работой. Функционирование автомобилей, например, невозможно без электрического тока, источником которого является аккумуляторная батарея, для постоянной зарядки которой и питания всех потребителей электрической энергией при движении служит генератор. Необходимая при этом мощность источников электрического тока на современных автомобилях достигает 2 кВт, напряжение 36 В.

Возникающие в результате действия электрической энергии повреждения связаны в основном с электроэрозионным изнашиванием различного рода электрических контактов (электроды свечей зажигания, реле, прерыватели, стартеры, генераторы и др.). Разрушение поверхностей контактов происходит вследствие переноса ионов материала с одного из них на другой, а также искрения и дугообразования с выделением большой тепловой энергии в зазоры между контактами.

Повреждения, вызываемые в результате действия того или иного вида энергии, часто проявляются не сразу с началом 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, топливные баки, детали систем выпуска отработавших газов. Знакопеременные механические нагрузки, действующие на рамы, валы, оси, рессоры и другие элементы автомобилей, приводят к их усталостному разрушению.

В реальных условиях эксплуатации вследствие постоянных изменений нагрузок, скоростей, температурных колебаний, степени загряз-

нения окружающей среды на конструктивные элементы машины одновременно могут воздействовать несколько различных негативных процессов, вызывающих потерю 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

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 действующих на них нагружений являются: силовое, в том числе и обусловленное трением сопряженных деталей; тепловое и коррозионное.

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. Внешнее проявление силового нагружения в зависимости от характера прилагаемого воздействия – 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

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

где P_B – внутренняя сила сопротивления в сечении элемента конструкции; F – площадь сечения элемента.

Таким образом, как следует из приведенной формулы, величина расчетного напряжения не зависит от материала детали, а зависит 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 $P_B = 1$ ньютона (Н). В связи с тем, что эта единица измерения является весьма малой величиной, чаще при расчетах используется мегапаскаль ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$).

В зависимости от характера изменения этих сил во времени различают два режима силового нагружения элементов конструкций: статический и динамический [25].

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

$$\sigma_H = \varphi_D \frac{\bar{P}}{F}, \quad (2.5)$$

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.

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

$$\sigma_H(t) = \varphi_D \frac{P(t)}{F(t)}, \quad (2.6)$$

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

Таким образом, в отличие от статического напряжения при динамическом режиме нагружения $\sigma_H(t)$ 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 воспринимающей такую нагрузку элементе кинетическая энергия практически мгновенно превращается в динамическую, вызывая деформацию этого элемента, его перемещение или разрушение.

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 $\Delta l_{ст}$ определяется из выражения

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

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

При ударном воздействии на деталь сила P_D , с которой твердое тело ударяет по элементу конструкции, называется ударной нагрузкой. Величина этой нагрузки определяется из выражения

$$P_D = k_D P_{ст}, \quad (2.8)$$

где k_D – коэффициент ударной динамичности.

Коэффициент k_d показывает, во сколько раз ударная нагрузка P_d больше, чем при ее статическом приложении $P_{ст}$ (рис. 2.3). Его значение находят по формуле

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

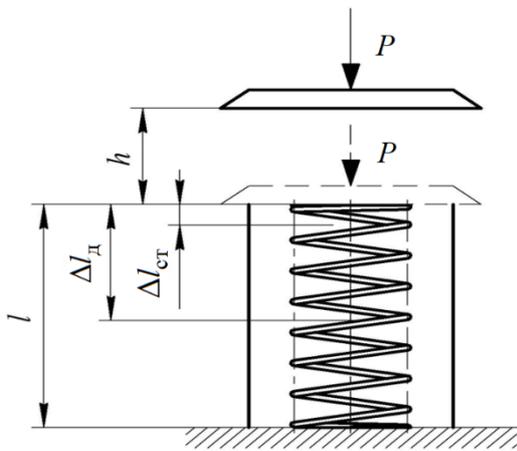


Рис. 2.3. Схема ударного эксплуатационного нагружения

где h – расстояние между прилагаемой нагрузкой и деталью; $\Delta l_{ст}$ – перемещение детали при статическом нагружении.

В соответствии с законом Гука перемещение Δl_d , вызванное в элементе динамической нагрузкой, также в k_d раз превышает перемещение $\Delta l_{ст}$, вызванное статическим 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. 2.4).

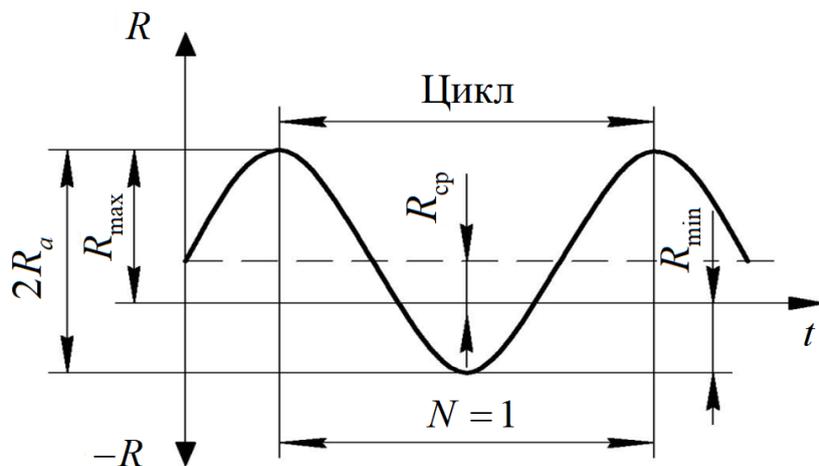


Рис. 2.4. Схема циклического нагружения:

R_{max} , R_{min} – максимальная и минимальная амплитуды нагрузки в цикле; $R_{ср}$ – средняя амплитуда нагрузки в цикле; R_a – амплитуда цикла

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

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

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 определённый момент времени, когда энергия эксплуатационного нагружения превысит энергию сопротивления материала, элемент конструкции теряет работоспособность и не может выполнять свое функциональное назначение.

В зависимости от вида нагружения в деталях автомобиля возникают различные виды эксплуатационных повреждений (усталость металла, остаточные деформации, старение, коррозия, изнашивание). Для автотранспортных средств и их конструктивных элементов процентное распределение этих повреждений приведено в табл. 2.1 [5].

Таблица 2.1. Основные причины потери автомобилем работоспособности

№ п/п	Наименование эксплуатационного повреждения	Процентное распределение
1	Изнашивание под воздействием сил трения	45 – 50
2	Пластическое деформирование	25 – 30
3	Усталостное разрушение	15 – 20
4	Коррозионное разрушение и старение	5 – 10

2.3.1. Трение и изнашивание деталей

Основная причина нарушения работоспособности машин – 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.

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

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

- *трение покоя* – трение двух тел до их перехода к относительному движению;
- *трение движения* – трение двух тел, находящихся в относительном 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. 2.5). Максимальное значение силы трения, преодолев которое подвижный элемент начинает скольжение, называется *силой трения покоя* $P_{\tau n}$. Далее при установившейся нормальной силе прижатия сила трения скольжения несколько меньше силы трения покоя и остается постоянной во времени ($P_\tau = \text{const}$).

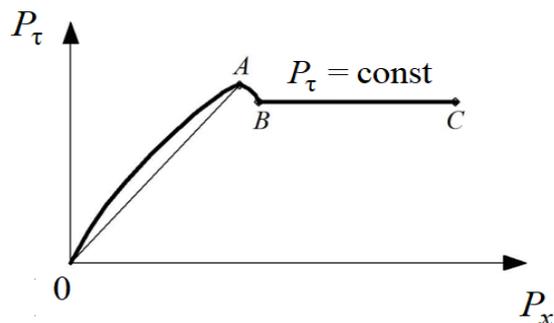


Рис. 2.5. Схема изменения силы трения P_τ при переходе от состояния покоя к движению: OA – состояние покоя; AB – переход от состояния покоя к движению; BC – движение

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, которые протекают в узле трения.

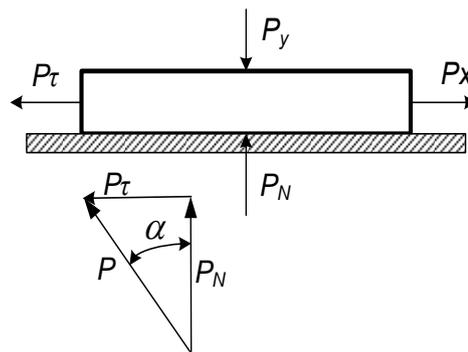


Рис. 2.6. Схема действия сил при трении скольжения

Из схемы видно, что коэффициент трения равен тангенсу угла наклона результирующей силы P и нормальной силы нагружения P_N , т.е. $f = \text{tg } \alpha$ (рис. 2.6).

В сопряжениях, изнашивание которых происходит в условиях трения качения (рис. 2.7), сила трения P_k зависит от нормальной составляющей внешних сил P_N , коэффициента трения качения f_k и радиуса цилиндра R :

$$P_k = f_k P_N / R. \quad (2.16)$$

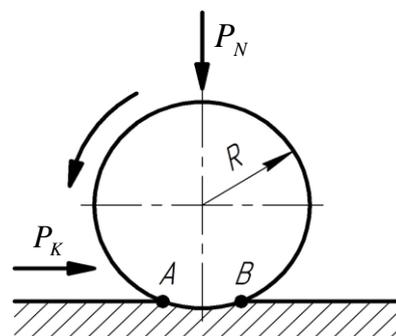


Рис. 2.7. Схема контакта рабочих поверхностей при трении качения

Наличие трения качения объясняется проскальзыванием контактирующих поверхностей. При взаимодействии материал цилиндра на участке *A-B* сжимается, а на плоскости вследствие упругопластических 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 относительном 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.

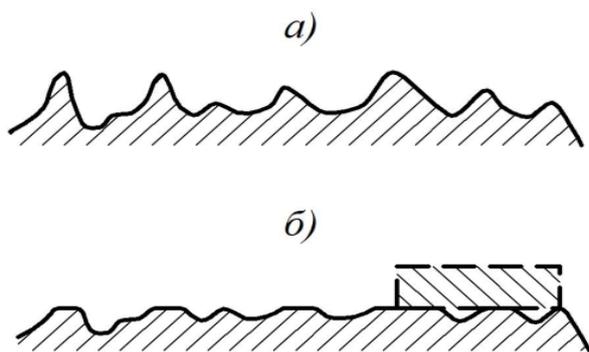


Рис. 2.8. Схема преобразования технологического рельефа поверхности (а) в эксплуатационный (б)

В процессе изнашивания исходный (технологический) рельеф поверхности детали преобразуется в эксплуатационный. При этом устанавливается та шероховатость поверхности, которая соответствует данному процессу разрушения поверхностных слоев в период нормального изнашивания (рис. 2.8).

Процесс изнашивания сопровождается изменением геометрических размеров и форм деталей,

увеличением зазоров и люфтов различных 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. 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. Ее величина может быть определена как сумма площадей соприкосновения микронеровностей

$$F_k = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (2.17)$$

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

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.

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 результате чего происходит их механическое сцепление. В зависимости от характера такого взаимодействия наблюдаются 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.

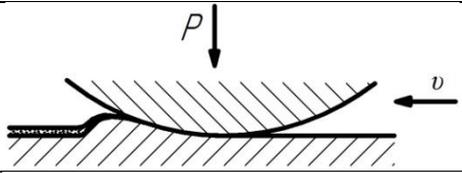
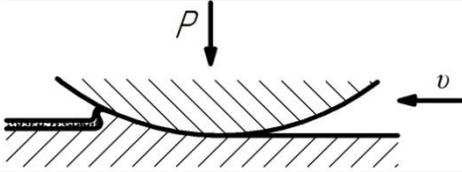
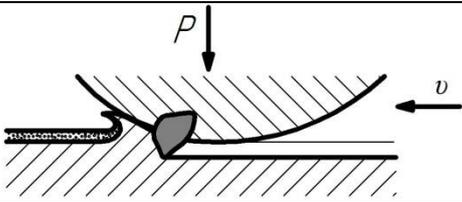
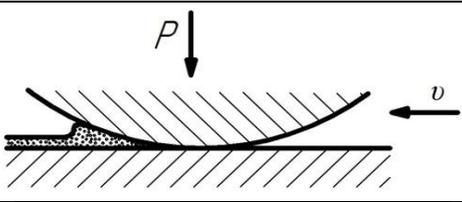
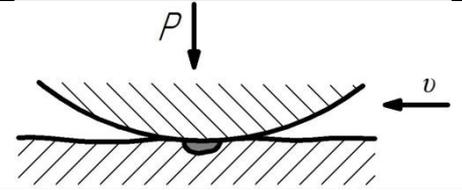
В соответствии с исследованиями И. В. Крагельского в зависимости от характера взаимодействия материалов, соотношения механической и молекулярной составляющих трения различают пять основных видов деформирования и разрушения деталей при изнашивании (табл. 2.2).

Основные и сопутствующие процессы изнашивания

В основе фундаментального изучения изнашивания деталей машин лежит положение о ведущих и сопутствующих процессах разрушения. Основным процессом при трении материалов, вызывающим износ деталей, является упругопластическая деформация, возникающая в результате взаимодействия микронеровностей поверхностей. Однако этот процесс сопровождается целой гаммой сопутствующих процессов (физических, химических, механических), протекающих в поверхностных слоях трущихся тел. К ним, прежде всего, относятся процессы окисления, усталостного разрушения, теплофизические и коррозионно-механические процессы и др.

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

Таблица 2.2. Виды деформирования и разрушения деталей при изнашивании

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

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 одинаковая и минимальная по сравнению с ее значениями вне зоны.

Одна из основных причин разрушения поверхностных слоев деталей – 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.

Микрорезание возникает в том случае, 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 – 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* – величина, обратная скорости или интенсивности изнашивания. Износостойкость материала зависит от большого числа факторов конструирования, производства и эксплуатации изделия. Важнейшее из них – структурное состояние материала, которое формируется на стадии 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. Пластическое деформирование деталей

Деформацией называется изменение формы и размеров детали под воздействием внешних сил (силовой нагрузки). Различают два вида деформации – упругую и пластическую.

Упругой деформацией называют деформацию, которая исчезает одновременно со снятием нагрузки или несколько позже в период «раз-

грузки» 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 элемент, 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:

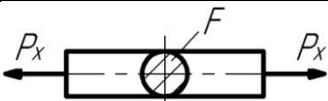
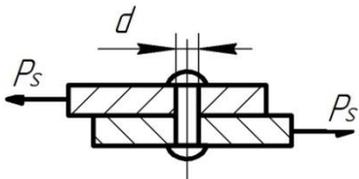
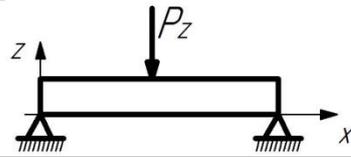
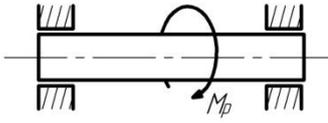
- нормальное напряжение прочности $\sigma_n = P / F$;
- касательное напряжение прочности $\tau_n = P_s / F_s$.

Нормальное напряжение противодействует 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.

Таблица 2.3. Классификация основных видов деформаций деталей

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

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 биевание фланца маховика.

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

$$\sigma_H = \sum_{i=1}^n \sigma_{H_i}, \quad (2.18)$$

где σ_{H_i} – 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 прилагаемой нагрузки может быть представлено диаграммой (рис. 2.9). При

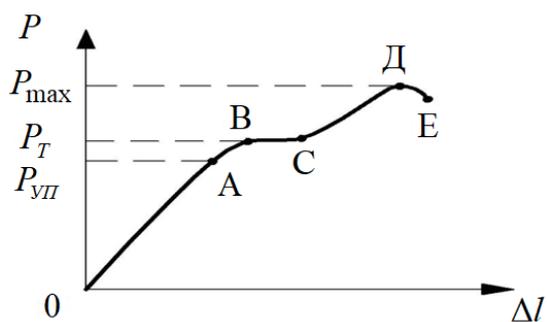


Рис. 2.9. Диаграмма зависимости «деформация – нагрузка»

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, соответствует пределу упругости.

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

$$\sigma_{уп} = P_{уп} / F, \quad (2.19)$$

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 *плато 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:

$$\sigma_T = P_T / F. \quad (2.20)$$

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 при максимальной нагрузке, предшествующей разрушению:

$$\sigma_{\text{в}} = P_{\text{max}} / F. \quad (2.21)$$

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

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 число деталей машин работает в режиме повторных переменных напряжений. Примером 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 $\sigma_{\text{уп}}$.

Исследования причин такого явления показали, что при многократном действии повторных нагрузок материал детали как бы «устает», его несущая способность исчерпывается, и он разрушается. Причина этого – 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. Именно в местах скольжения дислокаций перед препятствиями (посторонними внедрениями) зарождаются

микроскопические трещины, вызываемые разрывом связей в кристаллической структуре металла. Локальные напряжения в области скопления 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, в результате чего 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 % от 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. 2.10 приведены типичные эпюры внутренних напряжений I рода, когда остаточные напряжения максимальны непосредственно у поверхностного слоя.

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

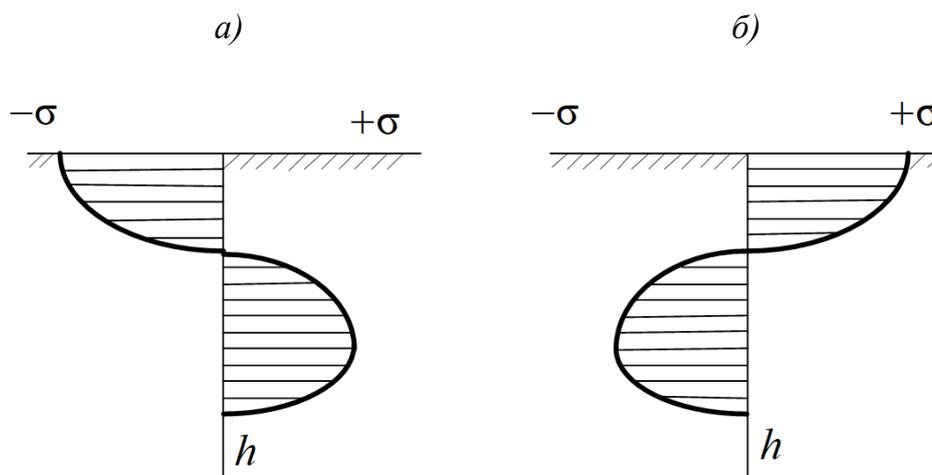


Рис. 2.10. Типичные эпюры остаточных напряжений I рода в поверхностном слое детали после механической обработки

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 Вёлера), которую получают с помощью испытаний серии гладких полированных образцов диаметром 10 мм (рис. 2.11).

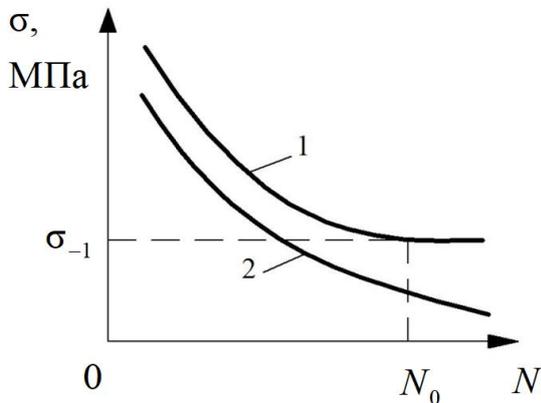


Рис. 2.11. Кривая выносливости: 1 – сталей, 2 – цветных металлов

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

$$N_0 = k(\Delta - \sigma_{-1})^{-m}, \quad (2.22)$$

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

Кроме механических характеристик на предел выносливости оказывают влияние такие факторы, как вид напряженного состояния, величина максимального и минимального нагружений, степень асимметрии цикла. Испытаниями установлено, что наиболее неблагоприятным с точки зрения выносливости материала является симметричный цикл нагружения (рис. 2.12).

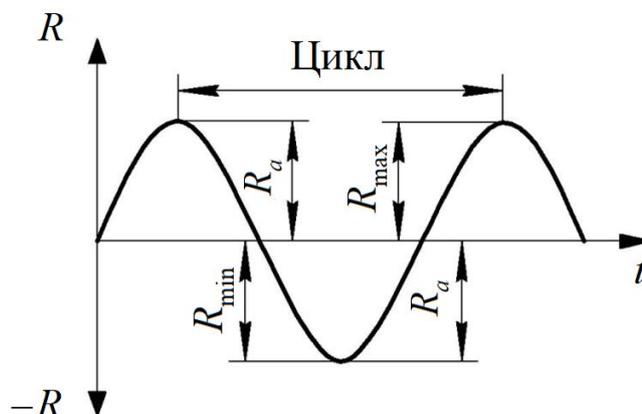


Рис. 2.12. Схема симметричного циклического нагружения

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

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 «слабого 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

$$\varepsilon_{\sigma} = \sigma_{-1Д} / \sigma_{-1}, \quad (2.23)$$

где $\sigma_{-1Д}$, σ_{-1} – пределы выносливости реальной детали и образца стандартного размера.

В табл. 2.3 приведены значения коэффициента масштабного фактора ϵ_σ для валов из конструкционных сталей в зависимости от их диаметра.

Таблица 2.3. Значение коэффициентов масштабного фактора

Сталь		Диаметр вала d , м						
		0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,10	0,20
Углеродистая	ϵ_σ	0,92	0,88	0,85	0,92	0,76	0,70	0,61
Легированная	ϵ_σ	0,83	0,77	0,73	0,70	0,65	0,59	0,52

Снижает предел выносливости детали наличие в ней различных концентраторов внутренних напряжений (рис. 2.13).

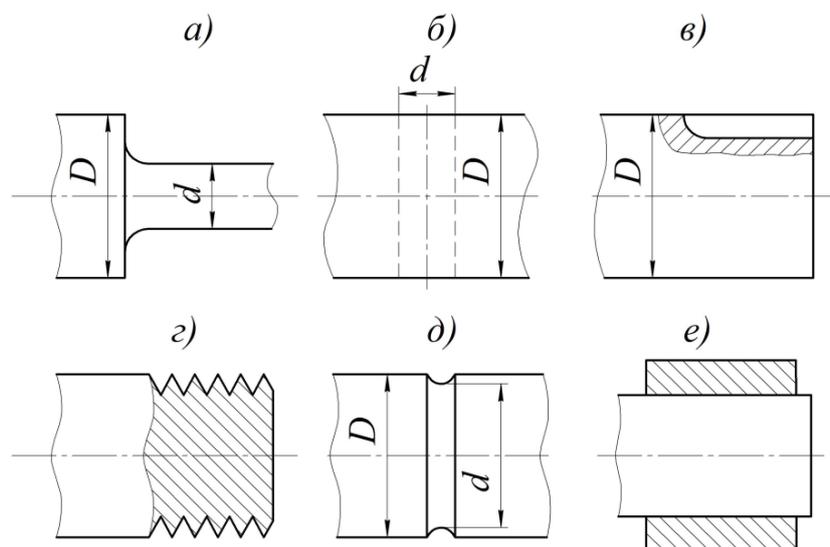


Рис. 2.13. Примеры концентраторов внутренних напряжений:
a – резкое изменение формы и размеров детали (вал с галтелью);
б – поперечное отверстие; *в* – шпоночная канавка; *г* – резьба;
д – выточка; *е* – края напрессованной детали

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:

$$k_{\sigma} = \sigma_{-1} / \sigma_{-1k}, \quad (2.24)$$

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 (микрорисок, 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 , представляющим собой отношение предела выносливости с определенной обработкой поверхности σ_{-1n} к пределу выносливости полированного образца σ_{-1}

$$\beta = \sigma_{-1n} / \sigma_{-1}. \quad (2.25)$$

На рис. 2.14 показаны зависимости значения коэффициента β от предела прочности стали σ_B и вида обработки поверхности детали.

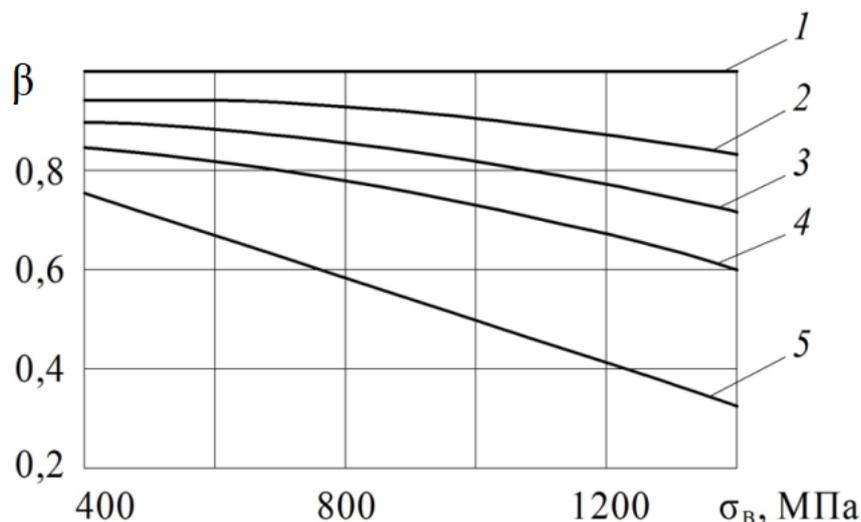


Рис. 2.14. Зависимость коэффициента качества поверхности β от предела прочности стали σ_B и вида обработки поверхности: 1 – полирование; 2 – шлифование; 3 – тонкая обточка; 4 – грубая обточка; 5 – наличие окалины

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 зарождение 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 существенные из этих факторов, характеризующих условия эксплуатации машины, – 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.

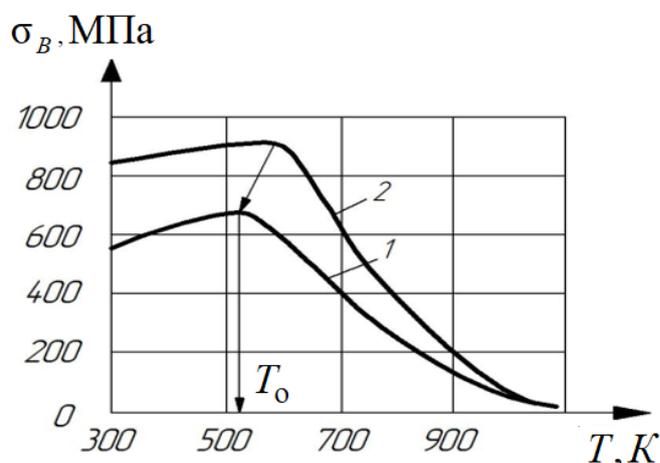


Рис. 2.15. Зависимость напряжений прочности σ_B от температуры: 1 – углеродистая сталь 45; 2 – легированная сталь 40X

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. 2.15, после достижения определенной (номинальной) температуры T_0 характеристики прочности материала, в том числе и предел выносливости,

с дальнейшим повышением температуры снижаются. 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 разрушения. 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 на кристаллический. Поэтому в качестве порога хладноломкости обычно принимают температуру, при которой в изломе содержится 50 % вязких волокнистых и 50 % хрупких кристаллических составляющих.

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.

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 – один 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 коррозии.

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 по-

верхности 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

$$I = \frac{U_c - U_m}{R}, \quad (2.26)$$

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.

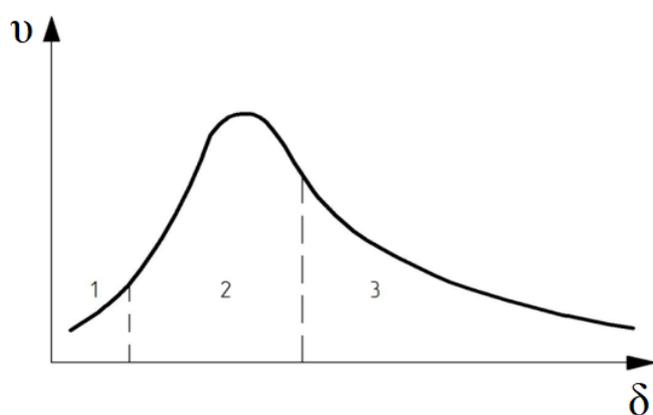


Рис. 2.16. Зависимость скорости атмосферной коррозии v от толщины пленки влаги δ на поверхности металла:
1 — поверхность сухая; 2 — влажная;
3 — мокрая

зия 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.

В зависимости от толщины пленки влаги на поверхности металла атмосферную коррозию можно условно подразделить на сухую, влажную и мокрую (рис. 2.16).

При сухой коррозии на металле под действием кислорода или сероводорода воздуха происходит окисление металла. На поверхности детали образуются невидимые глазом тончайшие окисные пленки по принципу химической коррозии. Такая коррозия

При 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 разделение 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 таких 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, щелевую, 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, являющейся в данных условиях анодной. Разрушение другой поверхности с электроположительным потенциалом (катодной) постепенно замедляется или прекращается. Контактная коррозия проявляется и в однородных металлах, соединенных 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. Причина щелевой коррозии – 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 – анодные. 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 поверхностями 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 бывает сплошной, которая охватывает всю поверхность детали, и местной, поражающей ее отдельные участки.

В зависимости от характера распространения и формы разрушения коррозия подразделяется на следующие виды (рис. 2.17):

а – равномерную, развивающуюся с одинаковой скоростью по всей поверхности металла;

б – неравномерную, протекающую на разных участках поверхности с различной скоростью;

в – подповерхностную, распространяющуюся под поверхностью;

г – точечную в виде отдельных точечных коррозионных поражений, диаметр которых меньше глубины проникновения;

д – в виде отдельных коррозионных пятен, диаметр которых значительно превышает глубину проникновения;

е – сквозную, вызывающую разрушение металла насквозь;

ж – нитевидную, распространяющуюся в виде нитей преимущественно под неметаллическими защитными покрытиями;

з – структурную, связанную со структурной неоднородностью металла;

и – межкристаллитную коррозию, которая распространяется по границам кристаллов металла;

к – ножевую, распространяющуюся на участках сплавления (сварки) металлов деталей, работающих в агрессивных средах.

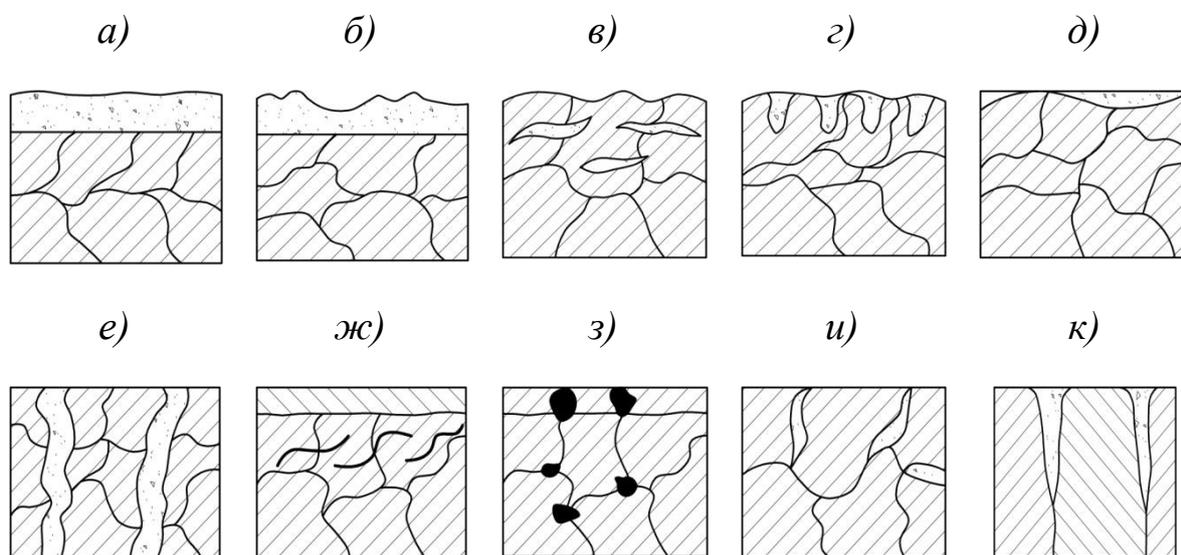


Рис. 2.17. Основные виды коррозии металлов

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;
- число коррозионных очагов 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 эффективный показатель оценки коррозии – 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 сопоставимой со снижением усталостной выносливости от надрезов и других концентраторов напряжения. На рис. 2.18 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.

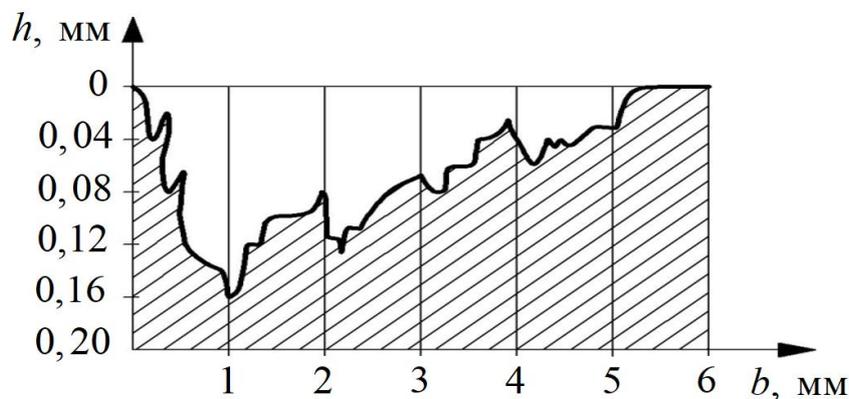


Рис. 2.18. Очаг коррозионного разрушения на крыле автомобиля: h , b – глубина и ширина каверны

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 разделить 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, причины которой – 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, удержания 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 оказывает включение в металл различных примесей в процессе изготовления деталей. Они попадают в материал детали в процессе получения полуфабрикатов (литье, обработка давлением и др.); при обработке поверхностей (механической, химико-термической, электрохимической и т.п.), 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.

Коррозию на открытых и доступных поверхностях деталей возможно своевременно выявить, поэтому могут быть приняты 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 деталей 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, как:

- 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 комбинированное покрытие, каждый слой которого имеет свое назначение и требует выполнения ряда технологических операций. Получение, например, надежного коррозионностойкого ЛКП кузова или кабины автомобиля включает в себя 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* – служит для образования связующего слоя между подложкой и последующими слоями покрытия;
- *шпатлевание*, предназначенное для выравнивания мелких дефектов на загрунтованных поверхностях;
- *окрашивание* – завершающая стадия 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.

Перспективный метод снижения коррозионных повреждений деталей – использование при их изготовлении металлов повышенной коррозионной стойкости (легированные стали и чугуны, алюминиевые сплавы и др.), а также 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 коррозионностойких металлов и сплавов, нанесении защитных покрытий, вторая – в обеспечении контроля и управления защитой от коррозии в эксплуатации.

2.3.5. 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 разделить 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 (термообработка, пластическое деформирование 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. В первой стадии происходит направленная диффузия атомов компонентов сплава (присадки к основному металлу) и их скопление в определенных участках кристаллической решетки. Во второй стадии в этих участках формируются очень малые объемы с новой кристаллической решеткой основного металла и присадки. В третьей стадии происходит отрыв одной решетки от другой и образование дисперсных частиц новой фазы. В четвертой стадии происходит укрупнение дисперсных частиц и переход нестабильной модификации новой фазы в стабильную.

В результате старения с образованием новых фаз двух различных решеток упрочняются сплавы, увеличивается их твердость, повышается сопротивление 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 на достижение 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, перепада температур, влажности, воздействия 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 повышенной температуры в зоне трения происходят механохимические процессы старения резинотехнических изделий, широко используемых в транспортных машинах. В процессе эксплуатации шин, например, в резине наблюдается изменение молекулярной структуры поверхностного слоя и как следствие ухудшаются прочностные, усталостные и другие свойства резины.

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. Какие процессы приводят к изменению начальных свойств изделий?
2. Назовите режимы эксплуатационного нагружения конструктивных элементов машин.
3. Какими параметрами характеризуется циклический (колебательный) режим динамического нагружения?
4. Назовите основные причины, вызывающие отказы и повреждения машин.
5. Приведите основные виды трения рабочих поверхностей машин.
6. Какими показателями оценивается процесс трения?
7. Раскройте физическую сущность изнашивания.
8. Приведите основные и сопутствующие процессы изнашивания.
9. Раскройте сущность процесса пластического деформирования материала деталей.
10. Приведите виды деформаций в зависимости от прилагаемых нагрузок.
11. Какие процессы приводят к усталостному разрушению?
12. Какими характеристиками оценивается долговечность деталей, работающих в условиях переменных нагрузок?
13. Приведите основные факторы, оказывающие влияние на выносливость металла.
14. Что понимается под коррозионным разрушением?
15. Объясните сущность химических и электрохимических процессов коррозии.
16. Какие виды коррозионного разрушения возникают в деталях машин?

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 разделены 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 микрочастиц трущихся поверхностей. Абразивный износ возможен 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.

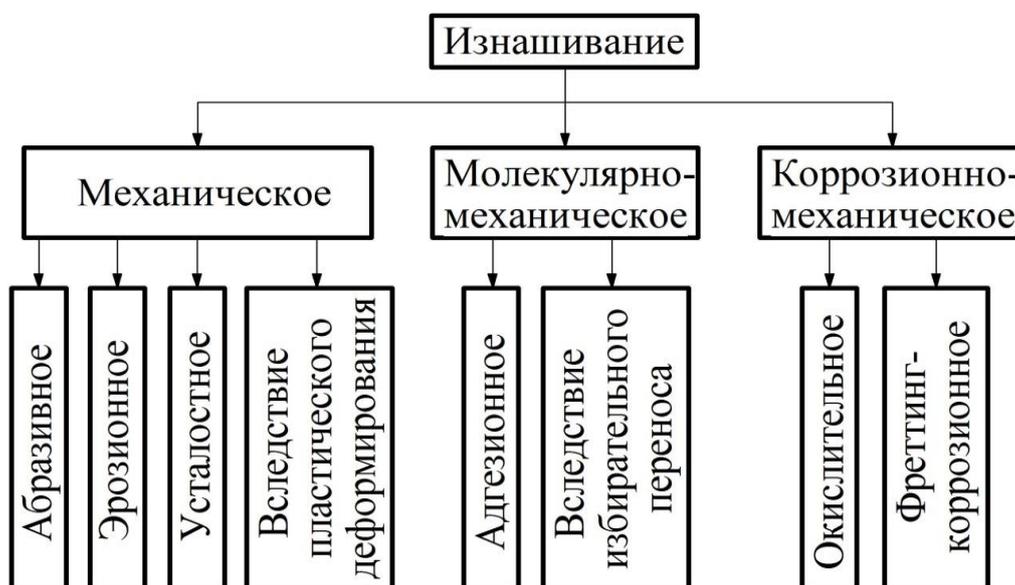


Рис. 3.1. Виды изнашивания деталей

Интенсивность абразивного изнашивания зависит от размеров, формы, твердости и свойств абразивных частиц, а также от физико-ме-

ханических 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, возникают упруго-пластическое деформирование и 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.

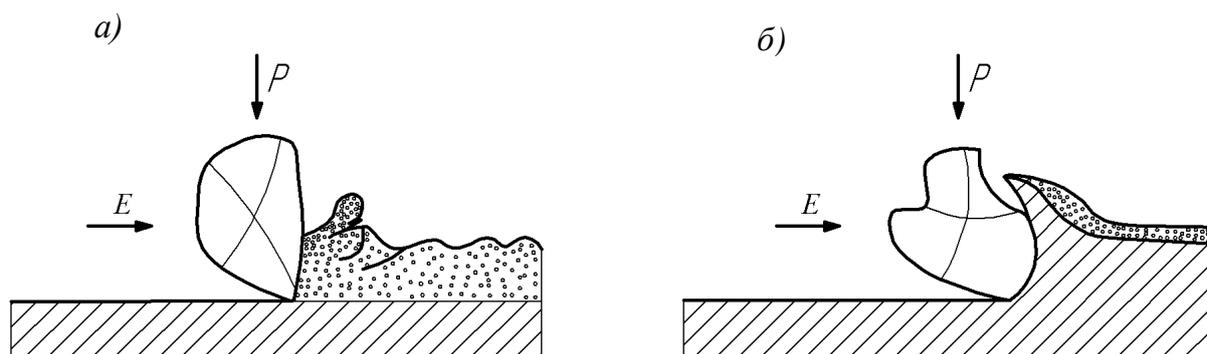


Рис. 3.2. Формы абразивного изнашивания:
a – механохимическая (коррозионно-механическая); *б* – механическая

Если твердость абразивной частицы H_a и твердость основного материала детали H_m соизмеримы, наблюдается механохимическая форма изнашивания. Результат такого изнашивания – разрушение абразивными частицами окисной пленки поверхностного слоя детали (рис. 3.2, *a*). При соотношении твердостей $H_a / H_m > 1,7$ возникает механическая форма повреждаемости (микрорезание), т.е. повреждение абразивными частицами основного материала детали (рис. 3.2, *б*).

Абразивное изнашивание – один из наиболее интенсивных процессов разрушения рабочих поверхностей при трении. Для уменьшения отрицательного влияния такого вида изнашивания на долговеч-

ность машин при их конструировании предусматриваются эффективные средства герметизации сопряжений, высококачественные фильтры для очистки воздуха, масел и топлива.

Разновидностями абразивного изнашивания являются *гидроабразивное* и *газоабразивное изнашивание*, которые возникают в результате действия твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе и перемещающихся относительно поверхности детали. Гидроабразивному изнашиванию, например, подвержены плунжерные пары, «мокрые» гильзы цилиндров дизельных двигателей, трубопроводы. Газоабразивному изнашиванию подвержены клапаны, поршневые кольца, зеркала цилиндров двигателей в результате контакта с потоком раскаленных газов. Интенсивность разрушения при газо- и гидроабразивном изнашивании зависит от следующих основных факторов:

- энергии удара частиц в потоках газа или жидкости о поверхность детали;
- твердости, прочности, размера и геометрии этих частиц;
- угла атаки, т.е. наклона вектора движения потока жидкости (или газа), несущего абразивные частицы, к поверхности детали.

Интенсивность гидро- и газоабразивного изнашивания определяется из выражения

$$J = kv^m, \quad (3.1)$$

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).

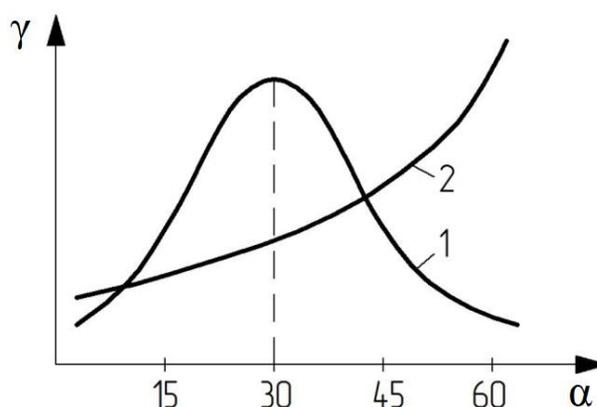


Рис. 3.3. Зависимость интенсивности гидро- и газоабразивного изнашивания γ от угла атаки α абразивных частиц: 1 – пластичные материалы; 2 – хрупкие материалы

С ростом угла атаки до 30° интенсивность гидро- и газоабразивного изнашивания для материалов с невысокой прочностью увеличивается. С дальнейшим увеличением угла наблюдается эффект упрочнения поверхности, аналогичный наклепу, поэтому интенсивность изнашивания снижается. Для хрупких материалов, обладающих высокой прочностью поверхностного слоя детали, интенсивность изнашивания резко возрастает, начиная с угла атаки $50 - 60^\circ$ (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.

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

Электрическая эрозия – это изнашивание под воздействием импульсных разрядов электрического тока. Такому виду изнашивания подвержены 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 мок-рых гильз цилиндров двигателей, лопастях и полостях водяных насосов, в трубопроводах и других деталях при отсутствии в рабочей жидкости абразивных частиц.

Усталостное изнашивание (контактная усталость) – следствие 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*, её 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).

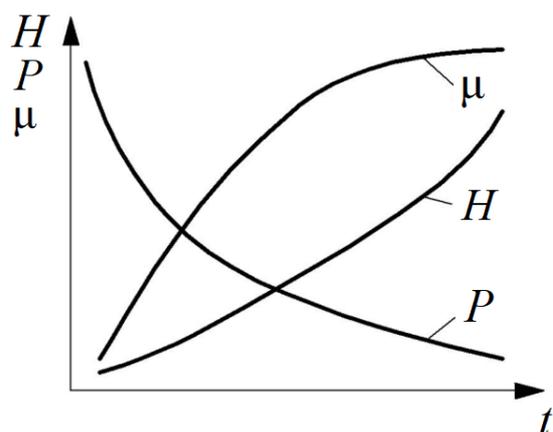


Рис. 3.4. Зависимость наработки t до возникновения усталостного выкрашивания от твердости металла H , эксплуатационного нагружения P и вязкости смазочного материала μ

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

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

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 возникает схватывание (схватывание II рода) по вершинам неровностей контактирующих поверхностей и их последующее разрушение. В результате происходит вырывание частиц материала, их перенос с одной поверхности на другую и абразивное воздействие вновь образовавшихся неровностей на сопряженную деталь. Такие процессы начинаются тогда, когда между сопряженными деталями исчезает разделяющая их смазка, а также окисные пленки.

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, сопровождающаяся прочным соединением (схватыванием) контактирующих участков поверхностей трения.

Под действием высоких эксплуатационных нагрузок рабочие поверхности деталей сближаются на расстояние межатомного взаимодействия, в результате чего образуются металлические связи. Разрушение этих связей может происходить по месту их образования (адгезионное разрушение) или на некоторой глубине рабочей поверхности с вырыванием частиц металла и их переносом с одной менее прочной поверхности на другую более прочную (рис. 3.5).

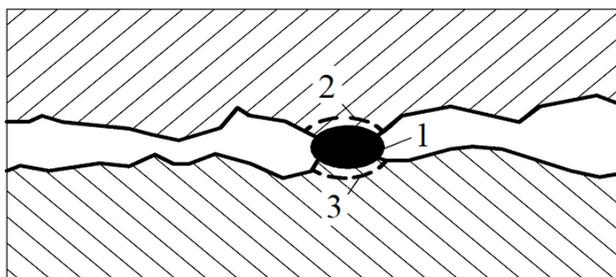


Рис. 3.5. Схема образования схватывания контактирующих поверхностей:
1 – локальный участок схватывания;
2, 3 – линии границ разрушения металлических связей

Изнашивание в результате схватывания является одним из наиболее опасных и разрушительных. Нередко оно сопровождается прочным соединением контактирующих участков поверхностей трения. В отличие от изнашивания других видов, для которых необходимо определенное время на развитие процесса и накопления разрушительных повреждений, при схватывании разрушение поверхности наступает достаточно быстро и приводит к аварийным формам повреждений. Такой вид изнашивания относится к недопустимым и 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 сервовитной 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 сервовитная 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 сервовитной 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 результате такого 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 про-

цесс 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 машин 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 достаточно сложный и включает в себя три стадии развития. В начальный период при возникновении проскальзывания сопряженных поверхностей под воздействием высоких нагрузок происходит 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; числа 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.

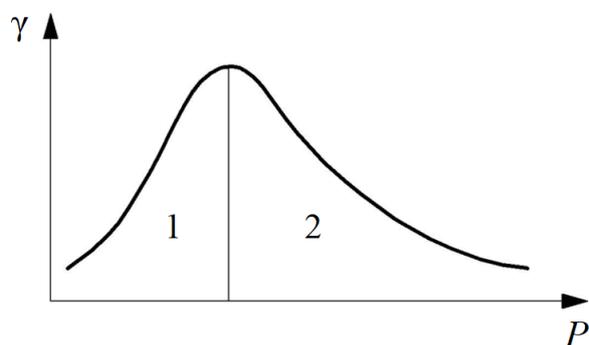


Рис. 3.6. Зависимость интенсивности изнашивания при фреттинг-коррозии от давления на поверхности трения

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

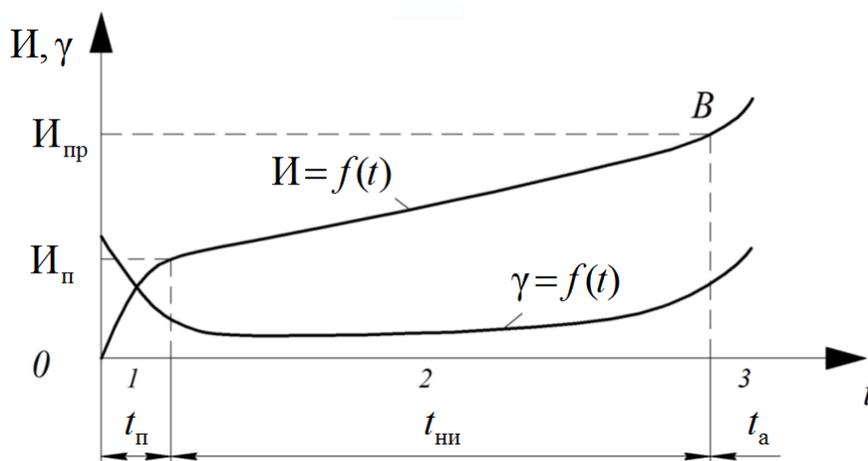


Рис. 3.7. Кривая изнашивания деталей машин:

I_{II} – износ за период приработки; $I_{пр}$ – предельный износ; $I = f(t)$ – кривая изнашивания; $\gamma = f(t)$ – скорость изнашивания; t_{II} – период приработки; $t_{НИ}$ – период нормального изнашивания; t_a – период аварийного изнашивания

В первый период $t_{п}$ (*период приработки*) происходит микро- и макрогеометрическая приработка поверхностей трения деталей. Этот период характеризуется интенсивным разрушением микрообъемов поверхности изнашивания, повышенным тепловыделением, изменением шероховатости. Для большинства конструктивных элементов современных машин продолжительность периода приработки незначительна (для автомобилей, например, она составляет 3 – 3,5 % их ресурса).

К завершению периода приработки скорость изнашивания монотонно убывает до значения $\gamma = \text{const}$, характерного для периода установившегося (*нормального*) изнашивания $t_{ни}$. Если нет причин, изменяющих параметры установившегося процесса изнашивания, то он протекает стационарно, и возможные отклонения от средней скорости процесса за счет его стадийности не влияют на общую линейную зависимость износа от наработки.

Третий период характеризует наступление *аварийного* изнашивания t_a , 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, возникают 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.

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 дей-

ствием 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 мкм (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, например, этот период составляет 95 % их ресурса). В этот период скорость изнашивания примерно постоянна, поэтому зависимость между величиной износа и наработкой является линейной

$$И = \gamma t, \quad (3.4)$$

где $И$ – 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:

$$И = И_{п} + \gamma t, \quad (3.5)$$

где $И_{п}$ – величина износа за период приработки.

3.4. Предельные и допустимые износы

В процессе эксплуатации технических систем 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 экономич-

чески 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 или ремонт детали диктуется износом хотя бы одной ее рабочей поверхности до предельного значения.

Определение предельного износа – сложная задача, 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 нормативов 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 более ускоренному процессу 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. 3.8). До какого-то износа эффективная мощность возрастает, а удельный

расход топлива снижается. С дальнейшим увеличением износа эффективная мощность плавно снижается, а удельный расход топлива, наоборот, повышается.

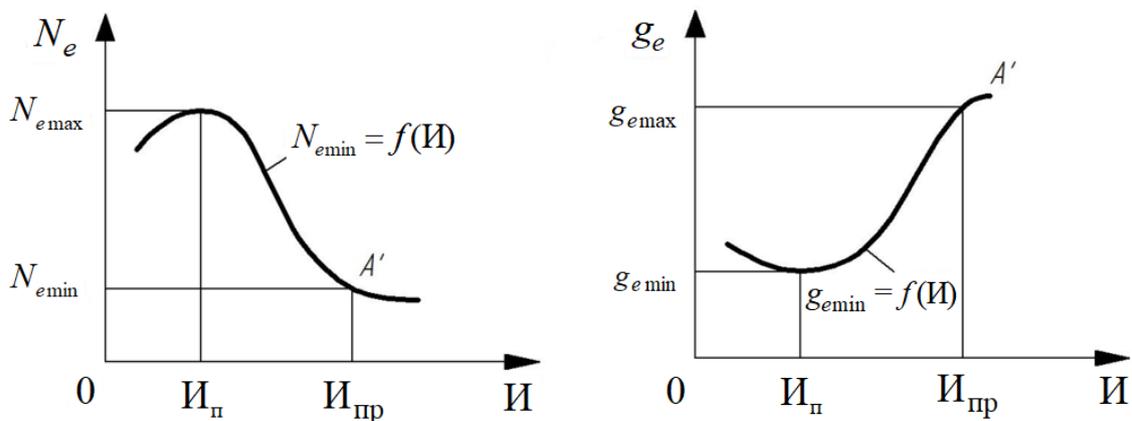


Рис. 3.8. Графики изменения эффективной мощности N_e и удельного расхода топлива g_e от степени износа двигателя

В первом периоде работы двигателя, когда происходит приработка его деталей (участок $0 - I_{п}$), потери мощности на работу сил трения максимальные. По мере приработки деталей потери мощности на преодоление внешнего трения снижаются и эффективная мощность при 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' определяет предельный износ двигателя, соответствующий $N_{e\min}$ и $g_{e\max}$. Дальнейшая эксплуатация 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. Нормативы на предельные износы в настоящее время имеются, как правило, для весьма ограниченной номенклатуры деталей. При этом

часто они недостаточно обоснованы, поэтому на практике при каждом ремонте машин приходится решать – пригодна деталь для дальнейшей эксплуатации либо она подлежит замене или восстановлению.

Из анализа кривой, выражающей в общем виде процесс изнашивания (см. рис. 3.7), предельный износ соответствует критической точке *B*, определяющей переход нормального изнашивания детали в аварийный. Установление этой точки имеет очень важное 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 отказу 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). Если же агрегат отправить в ремонт значительно раньше момента наступления предельного состояния, это 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 каких-либо других причинах 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 показывает практика, 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 быть, 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 важное 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 можно определить по известной кривой изнашивания и установленному нормативу предельного износа детали (рис. 3.9).

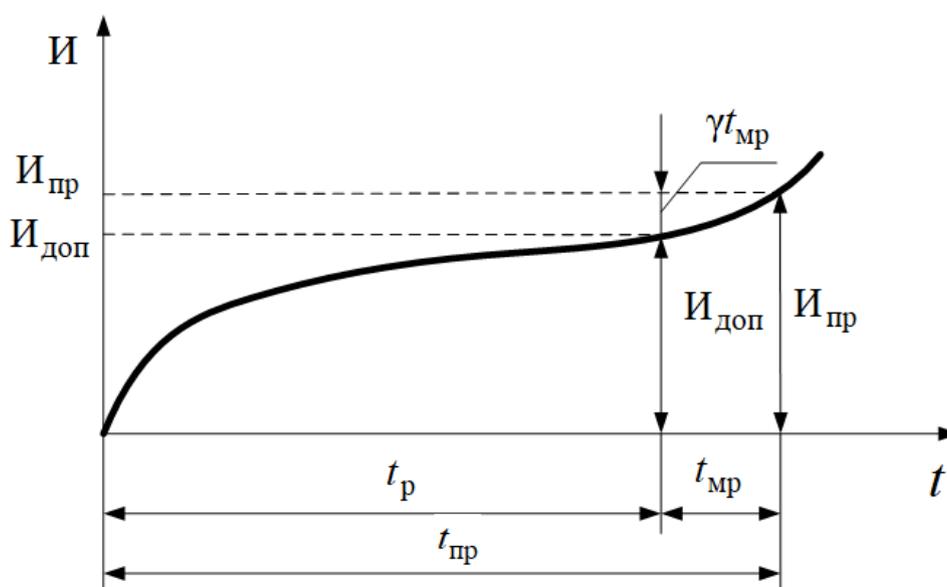


Рис. 3.9. Схема определения допустимого износа

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

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

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 восстанавливать или заменять деталь, при известной межремонтной наработке $t_{мр}$ будет равно

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

Определение допустимых зазоров сопряжений может быть представлено схемой (рис. 3.10).

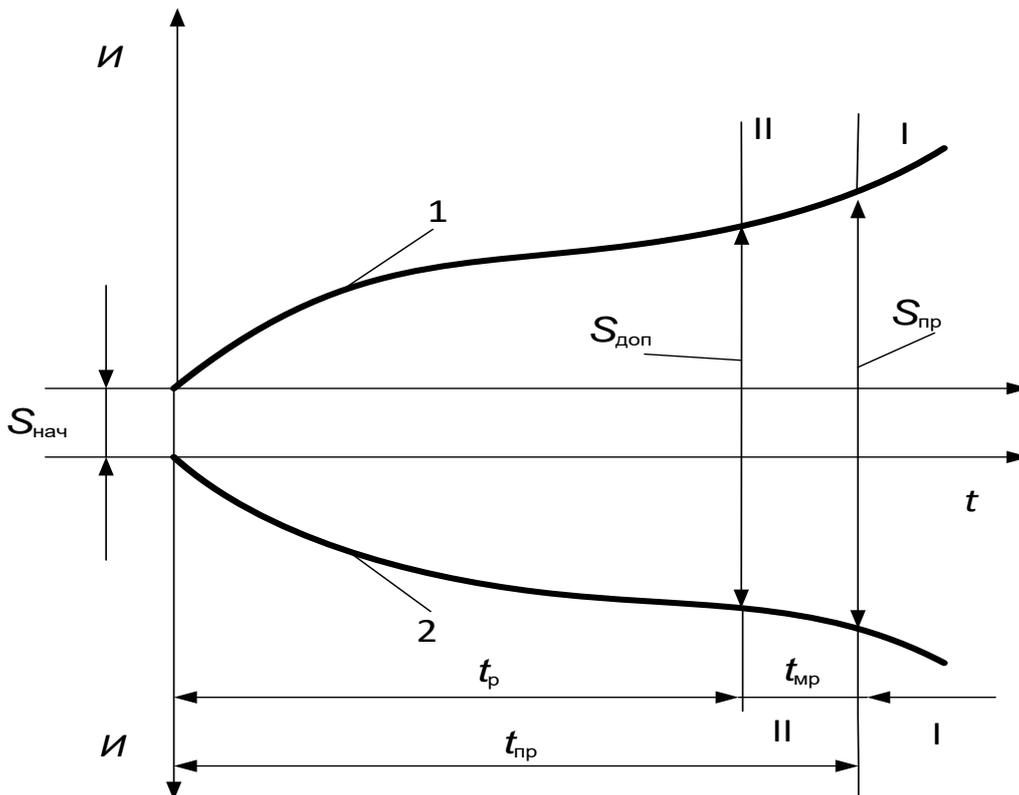


Рис. 3.10. Схема определения допустимого зазора в сопряжении:
 $S_{нач}$ – начальный зазор в сопряжении; $t_{пр}$ – наработка до предельного состояния сопряжения; $t_{р}$ – наработка с начала эксплуатации до данного ремонта

Если известны экспериментальные кривые износа двух сопряженных деталей и величина предельного зазора, то его допустимое значение, при котором сопряжение не потеряет 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 $S_{\text{доп}}$, равная расстоянию между кривыми изнашивания 1-й и 2-й 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.

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

Основные методы количественной оценки износа деталей и сопряжений – 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 машин. При недостаточной твердости материалов и больших удельных давлениях усталостное изнашивание может сопровождаться пластической деформацией.

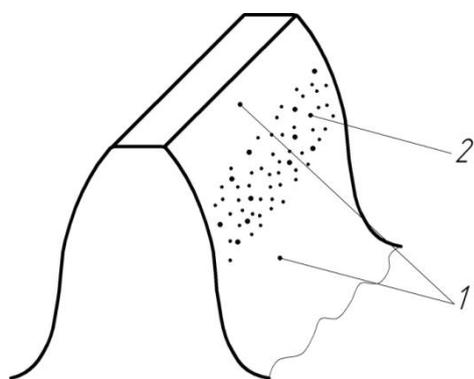


Рис. 3.11. Изнашивание зуба шестерни: 1 – зона наибольшего изнашивания; 2 – зона усталостного изнашивания

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. 3.11). 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 другие, к эксплуатационным и экономическим показателям – 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 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 используют 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; его достоинства – простота и несложность используемого инструмента, недостатки следующие:

- 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, используется в основном при исследовательских испытаниях и позволяет с большой степенью точности оценить распределение из-

носа 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.

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. 3.12).

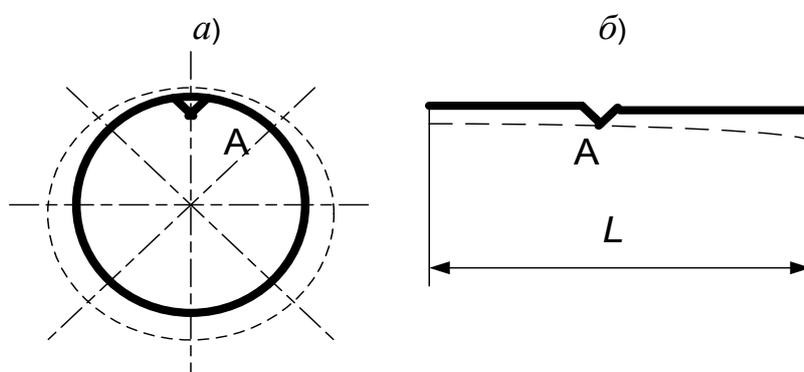


Рис. 3.12. Совмещение профилограмм: *a* – гильзы цилиндров двигателя; *б* – шейки вала в продольном сечении; *A* – метка для совмещения; *L* – длина измеряемого участка; — исходный профиль; --- профиль после цикла испытаний

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.

Метод отпечатков предусматривает нанесение на изнашиваемую поверхность углубления с помощью алмазной четырехгранной

пирамиды с углом при вершине между противоположащими гранями $\alpha = 136^\circ$ (рис. 3.13, а). Пирамида вдавливается в испытываемую 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

$$И = h_0 - h_1 = \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} (l_0 - l_1). \quad (3.9)$$

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. 3.13, б). Величина износа измеряется такими приборами, как УПОИ-6, оптико-механическим индикатором износа ОМИ-1 и др.

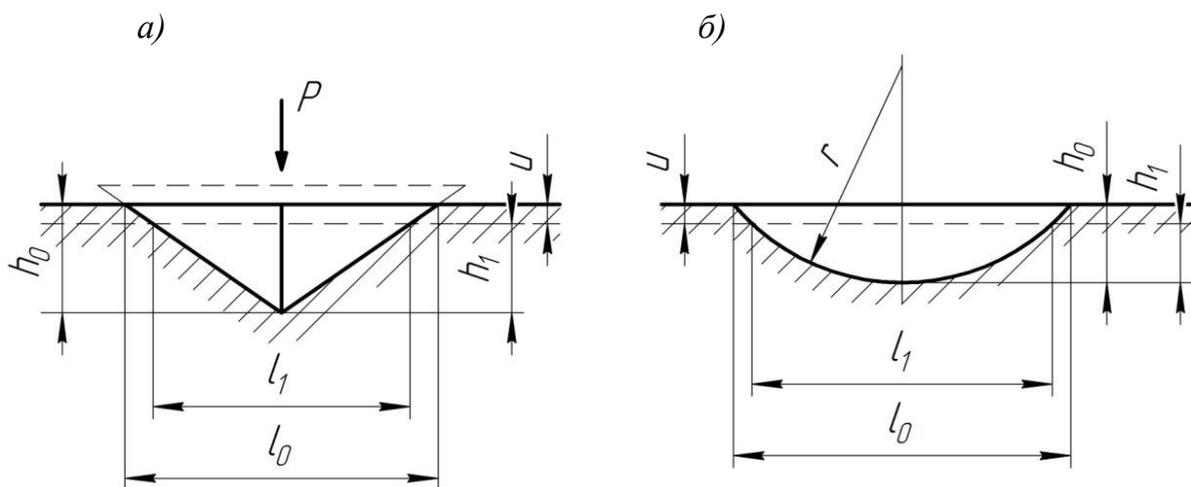


Рис. 3.13. Схема измерения износа методом искусственных баз: а – вдавливание алмазной пирамидой; б – вырезание лунки вращающимся резцом; P – усилие вдавливания; r – радиус лунки; h_0 и h_1 – начальная и конечная глубины углубления; l_0 и l_1 – начальная и конечная длины лунки

Для плоских поверхностей значение износа определяется из выражения

$$И = 0,125(l_0^2 - l_1^2)/r. \quad (3.10)$$

Для цилиндрических поверхностей

$$И = 0,125(l_0^2 - l_1^2)/(1/r \pm 2/R), \quad (3.11)$$

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.

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 изнашивания, 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 $K_{\text{пи}}$, например, через определенную продолжительность работы стабилизируется на уровне

$$K_{\text{пи}} = \frac{q}{q_{\text{ф}} + q_{\text{у}}}, \quad (3.12)$$

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. 3.14). Кривая показывает, что в период приработки интенсивность изнашивания постепенно уменьшается и на определенной наработке стабилизируется. Для получения достоверных результатов пробы масла должны отбираться на прогретом двигателе не позднее, чем через 20 мин после его остановки.

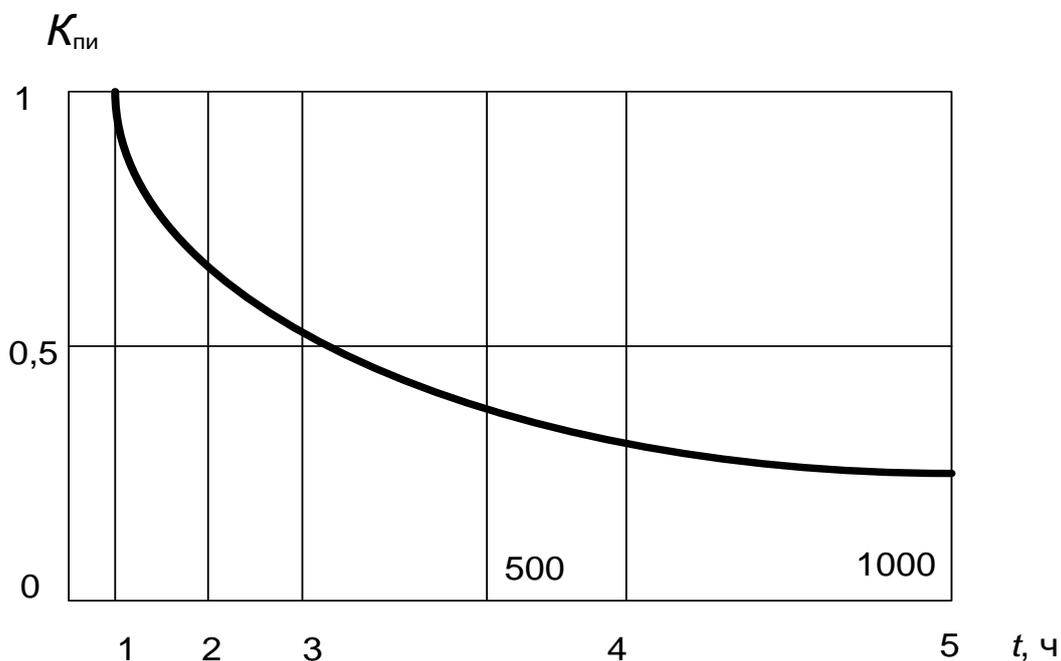


Рис. 3.14. Изменение концентрации продуктов изнашивания двигателя в масле: 1 – новый двигатель; 2 – после наработки 100 ч; 3 – после наработки 300 ч; 4 – после наработки 600 ч; 5 – после наработки 1000 ч

Недостаток метода определения износа по содержанию продуктов изнашивания в пробе отработанного масла – высокая стоимость используемого оборудования, а также невозможность оценки износа одной конкретной детали.

Вопросы для самопроверки

1. Какие виды изнашивания возникают в деталях машин?
2. В результате каких физических процессов происходит механическое изнашивание?
3. Приведите основные виды механического изнашивания.
4. Какие формы абразивного изнашивания возникают при трении сопряженных поверхностей?
5. Объясните сущность гидроабразивного и газоабразивного изнашивания.
6. Что понимают под усталостным изнашиванием деталей?
7. Раскройте сущность молекулярно-механического изнашивания.
8. Какие физические процессы приводят к коррозионно-механическому изнашиванию?
9. Что понимают под изнашиванием при фреттинг-коррозии? Для каких конструктивных элементов оно характерно?
10. Какие стадии включает в себя классическая форма кривой изнашивания?
11. Какими показателями оценивается процесс изнашивания?
12. Как определяют 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 величина износа по содержанию продуктов изнашивания в масле?

Глава 4

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Условно все факторы, оказывающие влияние на процесс изнашивания элементов технических систем, можно разделить на следующие группы:

- *конструктивные* (кинематические параметры сопряжения, вид трения и смазки рабочих поверхностей, характер их нагружения, механические характеристики материалов пар трения, качество сборки);
- *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. Зависимость интенсивности изнашивания от 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

$$\gamma = kP^m v^n, \quad (4.1)$$

где k – коэффициент, характеризующий износостойкость материалов пары трения и условия в зоне контакта (смазка, степень загрязнения, температура и др.); P – давление на поверхность трения; v – скорость относительного скольжения; m и n – постоянные, зависящие от вида 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

$$\gamma = Pkv. \quad (4.2)$$

Для практических целей значения P и v необходимо выбирать из условия, что изнашивание возможно (допускается) только в условиях стационарного участка (участки 2 на рис. 4.1, *а* 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).

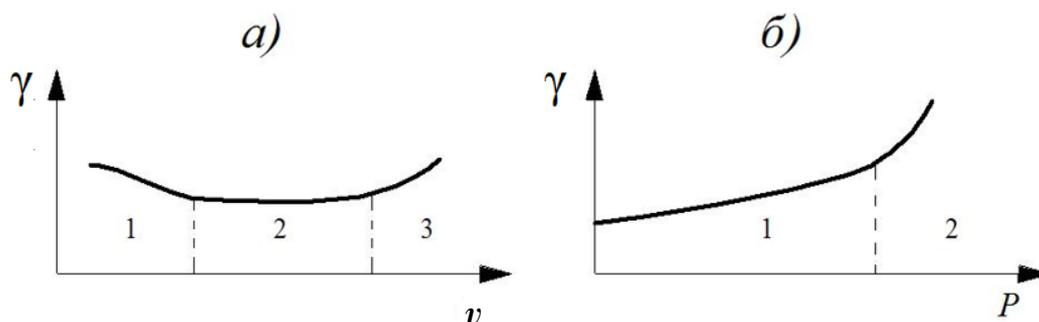


Рис. 4.1. Зависимости скорости изнашивания γ от скорости относительного скольжения v и давления на поверхности трения P

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.

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 выделяемая при трении теплота частично расходуется на нагрев материала деталей, а частично погло-

щается окружающей средой. Экспериментально установлено, что увеличение температуры поверхности трения Δt пропорционально приращению количества теплоты ΔQ , приходящейся на единицу поверхности детали

$$\Delta t = c\Delta Q, \quad (4.3)$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Интенсивность изнашивания для большинства материалов деталей с повышением температуры увеличивается. Однако в некоторых пределах такое повышение вполне допустимо, если не нарушается процесс нормального (установившегося) изнашивания.

Зависимость интенсивности изнашивания от температуры довольно сложная. При инженерных расчетах с достаточной для практических целей точностью для граничного и близких к нему видов трения ее можно принять линейной [1]:

$$\gamma = \gamma_0 + b\Delta t, \quad (4.4)$$

где Δt – изменение температуры поверхности детали при трении; b – коэффициент пропорциональности; γ_0 – интенсивность изнашивания при $\Delta t = 0$.

Для поверхностей, смазываемых под давлением, зависимость интенсивности изнашивания с изменением температуры Δt_1 (например, масла в картере двигателя) отличается от линейной:

$$\gamma = \gamma_0 - b\Delta t_1 + c(\Delta t_1)^2, \quad (4.5)$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Существует оптимальная температура масла, при которой интенсивность изнашивания смазываемых конструктивных элементов минимальная (рис. 4.2). При большем или меньшем ее значении интенсивность изнашивания возрастает.

При пониженных температурах деталей цилиндропоршневой группы интенсифицируются процессы коррозионно-механического изнашивания, так как на поверхностях конденсируются пары воды и кислот, образующихся в отработавших газах. В дальнейшем образовавшиеся пленки оксидов быстро разрушаются, так как их износостойкость на порядок ниже износостойкости материалов деталей двигателя. Кроме того, увеличение интенсивности изнашивания происходит вследствие того, что холодные моторные масла не образуют на трущихся поверхностях качественных масляных пленок.

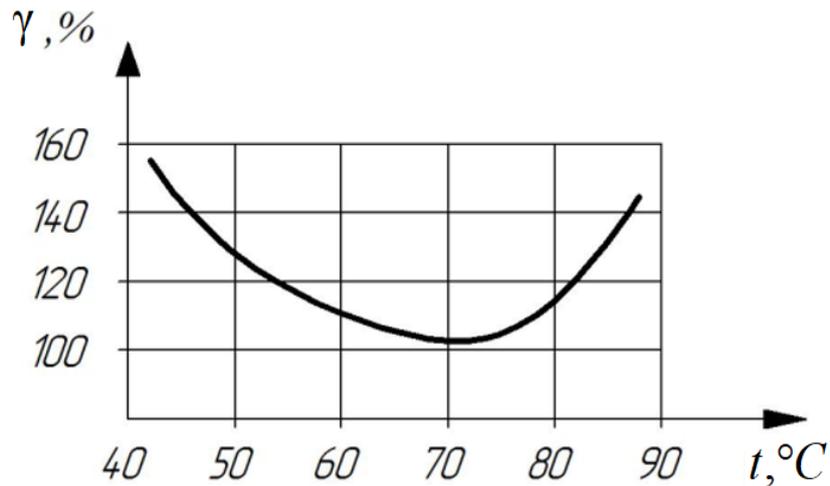


Рис. 4.2. Изменение интенсивности изнашивания цилиндров двигателя (расстояние 8 мм от верхней плоскости блока) в зависимости от температуры масла в картере t

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 поверхность 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 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 иметь 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.

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.

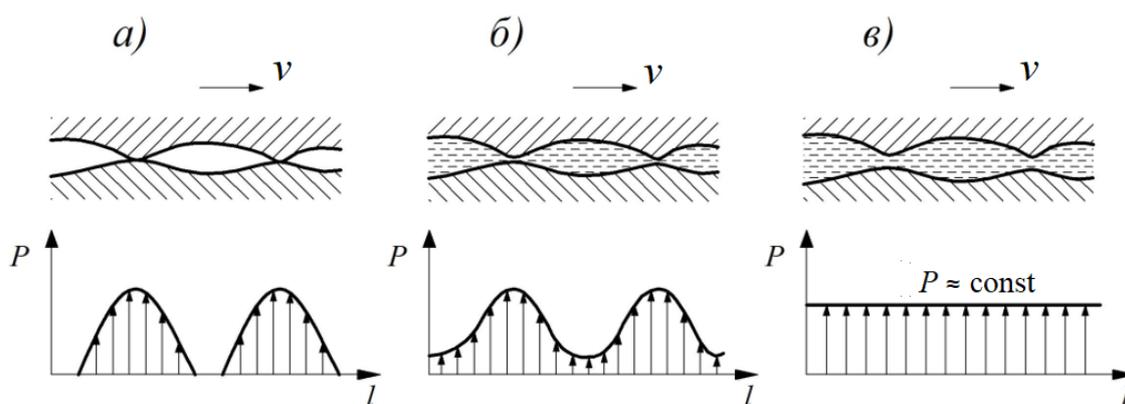


Рис. 4.3. Схематичное изображение основных видов трения:
а – сухое; *б* – граничное; *в* – жидкостное

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 контактом со смазочным материалом.

Коэффициент трения при жидкостном контакте поверхностей выражается соотношением

$$f = \frac{k\eta v}{P}, \quad (4.6)$$

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, уравнивающее 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*).

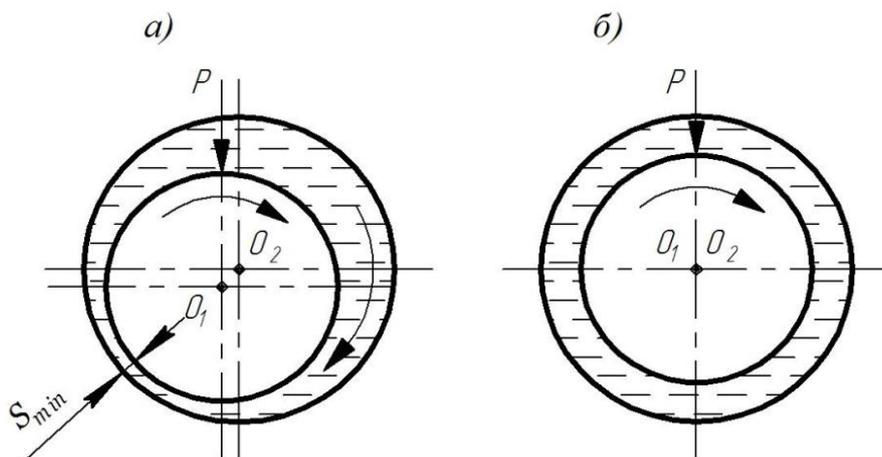


Рис. 4.4. Схема формирования масляного клина в подшипнике скольжения коленчатого вала: O_1 – центр шейки коленчатого вала; O_2 – центр подшипника

Для обеспечения надежного жидкостного трения минимальная толщина масляного слоя между трущимися поверхностями должна быть не менее

$$S_{\min} \geq 1,5(h_1 + h_2), \quad (4.7)$$

где S_{\min} – толщина масляного слоя; h_1 и h_2 – высоты выступов неровностей поверхностей сопряженных деталей.

При **граничном трении** поверхности сопряженных деталей разделены слоями смазочного материала очень малой толщины (до 0,1 мкм). Практически в местах контакта 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 материала 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 снижаются интенсивность изнашивания и коэффициент трения. В таблице приведены значения коэффициента трения для некоторых пар трения в зависимости от наличия слоя смазки.

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. Непременное условие создания гидравлического дав-

ления в слое смазки – возникновение сужающегося клиновидного зазора, в котором масло при трении образует подъемную силу (рис. 4.5).

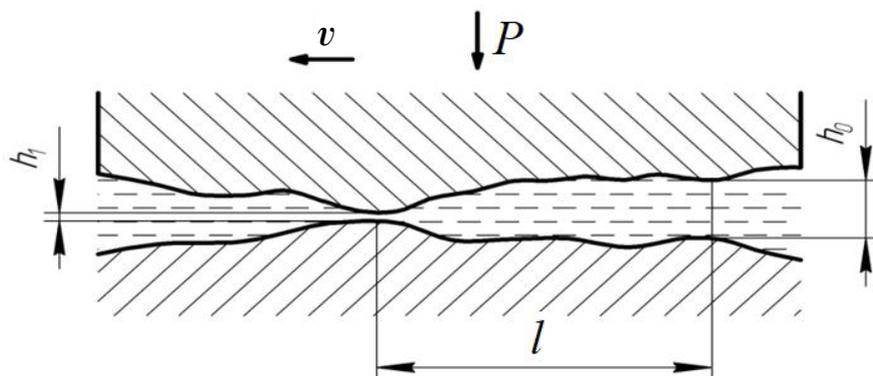


Рис. 4.5. Схема элементарного гидродинамического клина, возникающего в зоне трения: P – нормальная сила; h_0 и h_1 – зазоры в основании и вершине клина; l – длина масляного клина

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 А-А, проходящая через точку минимума коэффициента трения f_{\min} , отделяет область жидкостного трения (3) от двух других видов. При близких к нулю режимах 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 (параметр $\eta v/P$) толщина смазочного слоя увеличивается, снижаются механические и молекулярные воздействия на поверхность трения и создаются условия для полужидкостного трения (область 2).

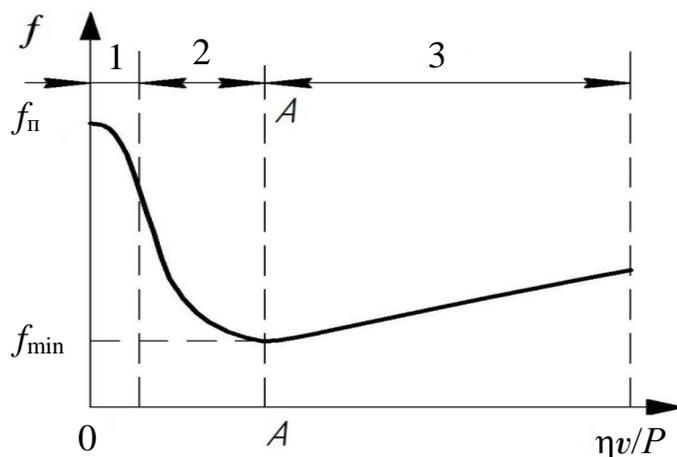


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента трения от режима работы сопряжения

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, 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.

По назначению смазочные масла, используемые в машинах, подразделяются на моторные, трансмиссионные и гидравлические. Отдельный класс смазочных материалов занимают пластические (консистентные) смазки.

Моторные масла

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 современные моторные масла должны обладать целым комплексом эксплуатационных свойств, обеспечивающих высокий уровень надежности двигателей. К важнейшим из них относятся:

- вязкостно-температурные;
- антифрикционные;
- противоизносные;
- противокоррозионные;
- антиокислительные;
- моюще-диспергирующие;
- противопенные.

Вязкостно-температурные свойства смазочного материала характеризуют их 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

$$F = \eta S dv/dx, \quad (4.8)$$

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 в диапазоне температур от 0 до 100 °С. Показатели этих свойств – динамическая вязкость, кинематическая вязкость и индекс вязкости.

Динамическая вязкость η характеризует связь силы внутреннего трения F со скоростью относительного перемещения слоев смазки v и определяется из выражения (4.8). Единицей измерения динамической вязкости служит паскаль-секунда (Па·с).

Кинематическая вязкость ν определяется отношением динамической вязкости η к плотности смазочного материала

$$\nu = \eta / \rho, \quad (4.9)$$

где ρ – плотность смазочного материала, определяемая отношением массы смазочного материала m к его объему V

$$\rho = m / V. \quad (4.10)$$

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 и др.). Прокачиваемость масла определяется его расходом при прохождении через узел трения. При снижении прокачиваемости возможно возникновение «масляного голодания» и преобразования 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 температура застывания масла (масло из жидкотекучего переходит в пластическое состояние). Поэтому при выборе масла стремятся к тому, чтобы изменение вязкости в заданном диапазоне температур было бы 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 в сравнении с эталонными маслами. Чем выше значение ИВ, тем меньше изменяется вязкость масла при изменении температуры и выше его вязкостные свойства.

Для сглаживания вязкостно-температурных характеристик и повышения ИВ масел в них вводятся различные загущающие и депрессорные 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.

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, VANLUBE-871 и др.

Противоизносные свойства масла характеризуют их способность снижать интенсивность изнашивания трущихся деталей и потери на трение. Эти свойства масел обеспечиваются введением в них присадок ЭФО, ДФБ, МАСМА-1603, MOLYVAN-855.

Противозадирные свойства масел обеспечивают присадки, препятствующие возникновению молекулярно-механического изнашивания, заедание и схватывание трущихся поверхностей. Присадки способствуют образованию пленки, которая выдерживает большие нагрузки и предотвращает заедание и схватывание микронеровностей трущихся поверхностей.

Антикоррозионными 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 защитные пленки, или нейтрализации продуктов окисления.

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, клапаны).

Окисление масла – нежелательный процесс, 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 – наиболее опасные отложения, 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.

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 окислители, карбены и карбоиды, нейтральные смолы.

Процесс образования лаковых пленок включает в себя окисление тонких слоев смазочного материала на поверхностях деталей, нагретых до высоких температур, 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 деталях 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 (сажи) 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, ТЭФ-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.

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 образующейся 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 *поликсилосаны*.

Трансмиссионные масла

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 скоростей 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 вводят противоизносные, противозадирные, антиокислительные, антикоррозионные и депрессионные присадки. Отечественные предприятия выпускают 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 антикоррозионными 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.).

Для автотракторных, дорожных, строительных и сельскохозяйственных машин используют 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 используют для смазки подшипников качения и скольжения, шарнирных и шлицевых сопряжений, накопителей 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 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, ЦИАТИМ-221, ДТ-1, № 158, Лита.

4.5. Зависимость интенсивности изнашивания от механических характеристик и структуры материалов деталей

Изнашивание так же, 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 приводит к разрушению микровыступов поверхностного слоя и 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 (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). Для чистых металлов и термически необработанных сталей зависимость между твердостью и относительной износостойкостью определяется выражением

$$\varepsilon = bH, \quad (4.11)$$

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b'(H - H_0), \quad (4.12)$$

где ε_0 – относительная износостойкость стали в отожженном состоянии; b' – коэффициент пропорциональности, имеющий разную величину для сталей разного химического состава; H – твердость термически 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 в материале детали.

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 металла с неметаллом (например, сталь, представляющая собой сплав железа с углеродом).

Для сплавов положительное влияние на повышение износостойкости оказывают мелкозернистая структура, наличие твердых структурных составляющих, наличие 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 повышаются ее твердость $HВ$, пределы прочности σ_B и текучести σ_T , но снижается ударная вязкость kC (рис. 4.7).

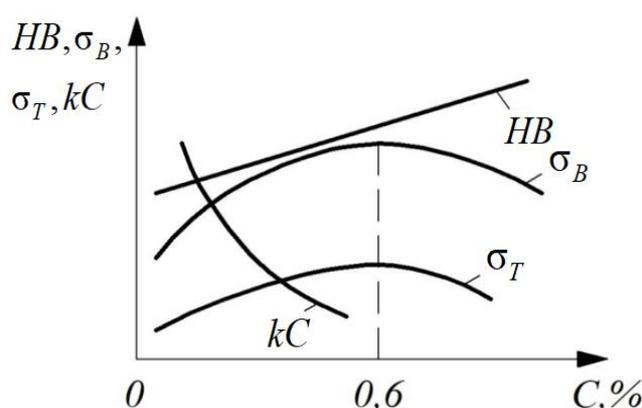


Рис. 4.7. Зависимость механических свойств сталей от содержания углерода

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 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, являясь концентраторами напряжений, 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 подобном изнашивании определяется скоростью образования таких вторичных структур и их свойствами.

4.6. Влияние на изнашивание качества поверхности деталей

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 (химический состав, структура и твердость поверхностного слоя, остаточные напряжения в нем) рассмотрены в предыдущем разделе. К важнейшим геометрическим параметрам качества поверхности относятся макрогеометрия, шероховатость и волнистость.

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 деталей наиболее характерны отклонения от круглости и профиля продольного сечения (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, шейки коленчатых валов, тонкостенные вкладыши, прецизионные элементы топливных насосов высокого давления и др.

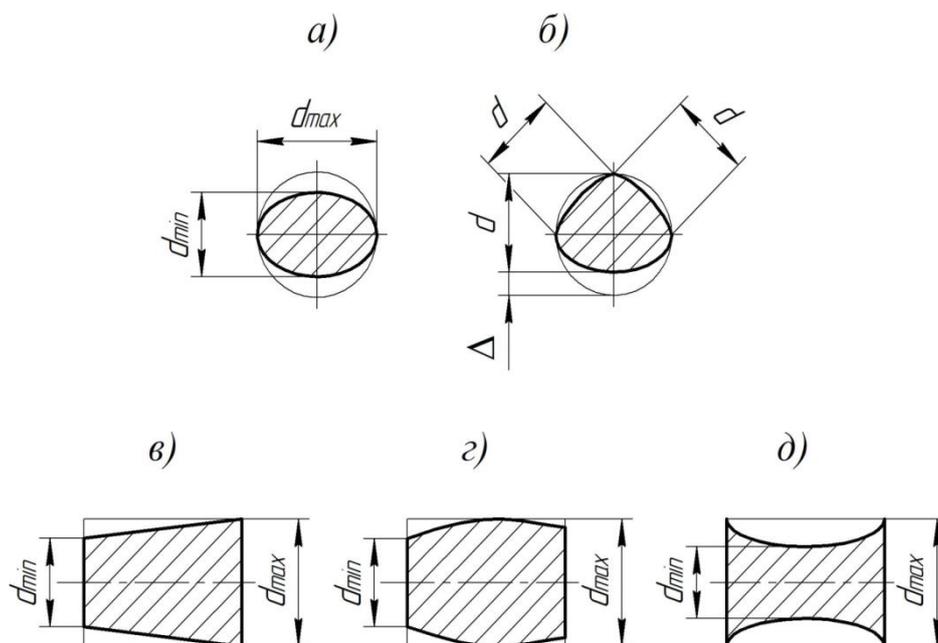


Рис. 4.8. Отклонение формы цилиндрических поверхностей:
a – овальность; *б* – огранка; *в* – конусообразность;
г – бочкообразность; *д* – седлообразность

Шероховатостью поверхности согласно ГОСТ 25142-82 называется совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами в пределах базовой длины L . Профилограмма шероховатости поверхности показана на рис. 4.9.

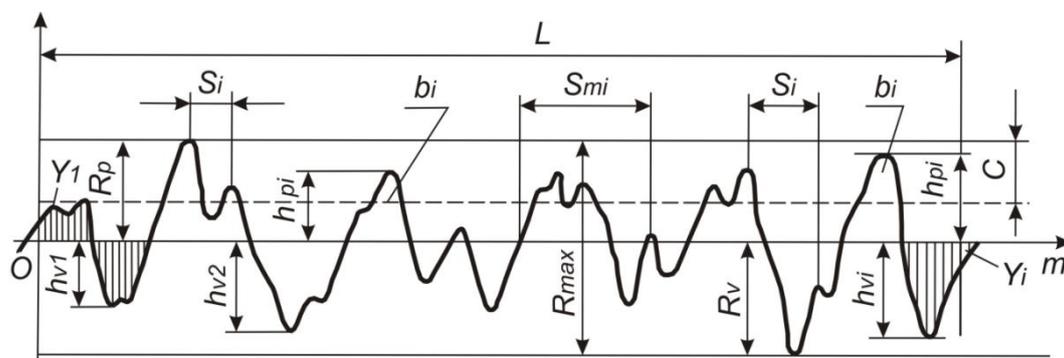


Рис. 4.9. Профилограмма определения шероховатости поверхности

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.

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

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (4.13)$$

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 выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины L :

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |h_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |h_{vi}| \right], \quad (4.14)$$

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

$$R_{max} = R_p + R_v, \quad (4.15)$$

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

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}, \quad (4.16)$$

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

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (4.17)$$

где S_i – шаг неровностей профиля, равный длине отрезка средней линии, заключенного между проекциями на нее наибольших точек двух соседних местных выступов профиля.

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.

Для каждой пары трущихся деталей на установившихся после приработки режимах их работы формируется своя оптимальная «эксплуатационная» шероховатость. Поэтому смысл этапа приработки и заключается в том, что микрогеометрия поверхностей трущихся пар переходит от начальной технологической к установившейся эксплуатационной.

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 прочность 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. 4.10):

- *высота волнистости* – среднее арифметическое пяти ее значений

$$h_{wi} = \frac{1}{5}(h_{w1} + h_{w2} + h_{w3} + h_{w4} + h_{w5}); \quad (4.18)$$

- *наибольшая высота волнистости* $h_{w \max}$ – расстояние между высшей и низшей точками измеренного профиля в пределах одной полной волны L_w ;

- *средний шаг волнистости* S_w – среднее арифметическое шагов S_{wi} , измеренных по средней линии профиля m_w :

$$S_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{wi}. \quad (4.19)$$

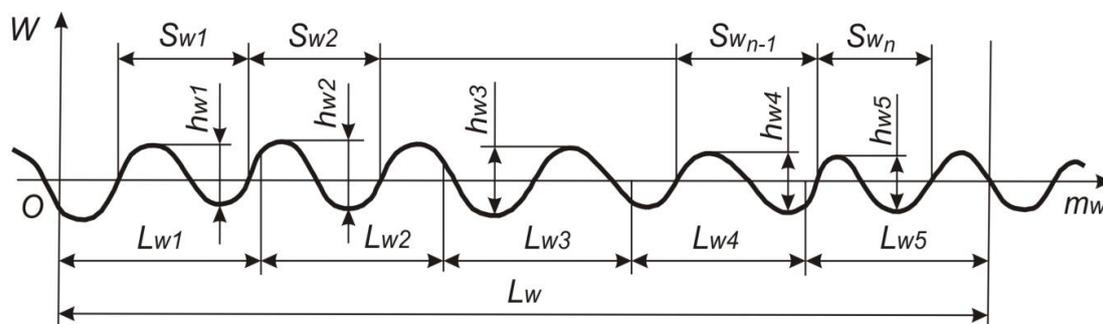


Рис. 4.10. Профилограмма определения волнистости поверхности

Шероховатость, волнистость, отклонение формы поверхности существенно влияют на показатели надежности машин и их агрегатов. Эти погрешности возникают как в процессе изготовления деталей, так и в процессе эксплуатации машины под воздействием силовых и температурных деформаций и вибраций.

4.7. Влияние на изнашивание условий эксплуатации

В общем случае на интенсивность изнашивания деталей транспортных машин оказывают влияние большое число 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. 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 – 300 г на одну тонну топлива.

Для транспортных средств среди многих факторов, характеризующих состояние дорог, доминирующее значение при потере ими работоспособности имеют неровности дороги (дороги с переменным микро- и макропрофилем). 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. Для автотранспортных средств это касается прежде всего таких узлов и агрегатов, 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 $+15$ °С (рис. 4.11).

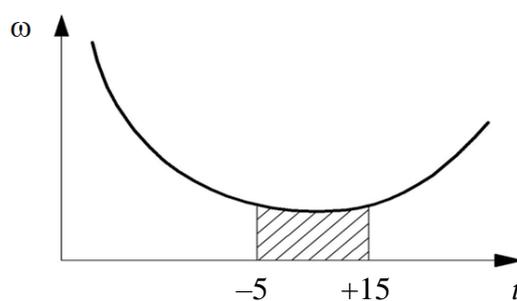


Рис. 4.11. Зависимость количества отказов автомобиля от температуры окружающего воздуха t , °С

Агрессивность окружающей среды связана с коррозионной активностью воздуха, что характерно при эксплуатации автомобилей в прибрежных морских районах или при их использовании для постоянной 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.

Решающее влияние на показатели надежности двигателя оказывают нагрузочный и скоростной режимы его работы. Нагрузочный режим характеризуется величиной среднего эффективного давления в цилиндрах P_e , а скоростной – частотой вращения коленчатого вала двигателя n . Экспериментальные зависимости величины износа ряда деталей цилиндропоршневой группы двигателя ЗМЗ показаны на рис. 4.12 [11].

Из приведенных на рис. 4.12, 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 давление в цилиндрах P_e). С ростом нагрузки, т.е. с увеличением подачи топливовоздушной смеси, интенсивность изнашивания деталей возрастает практически прямо пропорционально величине P_e (рис. 4.12, 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 повышения температуры на поверхностях трения из-за повышения нагрузочных режимов двигателя.

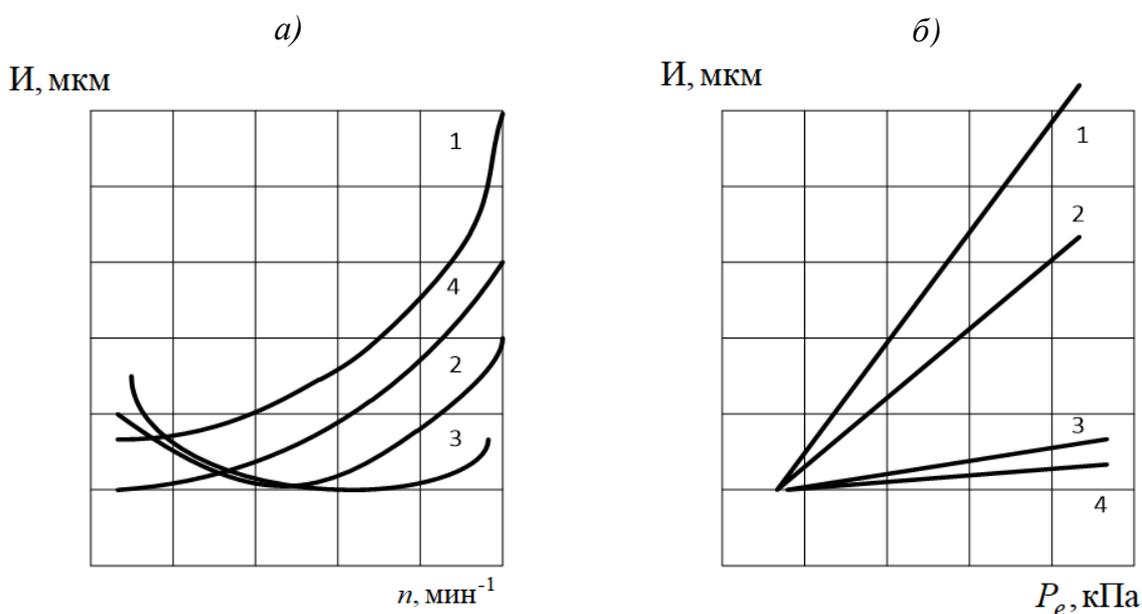


Рис. 4.12. Влияние частоты вращения коленчатого вала n и среднего эффективного давления P_e на износ деталей двигателей ЗМЗ:
 a – при $P_e = \text{const}$; b – при $n = \text{const}$; 1 – цилиндры; 2 – поршневые кольца;
 3 – шейки коленчатого вала; 4 – стержни клапанов и направляющие втулки

Таким образом, повышенный скоростной и нагрузочный режимы приводят к увеличению интенсивности изнашивания деталей двигателя

и снижению его ресурса. При этом, как следует из рис. 4.12, 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.

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 различные 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 понимают 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 ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для решения проблемы обеспечения высокого уровня надежности и работоспособности технических систем необходимы различные сведения об условиях их работы, 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 систем на всех стадиях их жизненного цикла и основой для разработки мероприятий по совершенствованию конструкций, технологических процессов их изготовления и технической эксплуатации.

Источниками информации о надежности машин являются расчеты при их проектировании, различные виды стендовых и дорожных испытаний, статистические данные об отказах конструктивных элементов, характере и причинах их возникновения, наработках до предельного состояния и других показателях эксплуатационной надежности.

На начальной стадии создания машины (проектирование) основными источниками об уровне ожидаемой надежности являются результаты конструкторских расчетов и статистические данные об 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 технической системы или

отдельного узла в результате их последовательного или параллельного соединения представляются в виде расчетной конструктивной схемы.

Последовательной называют схему соединения конструктивных элементов, при которой необходимое и достаточное условие нарушения работоспособности – отказ хотя бы одного из элементов (рис. 5.1, а). Нарботка 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.

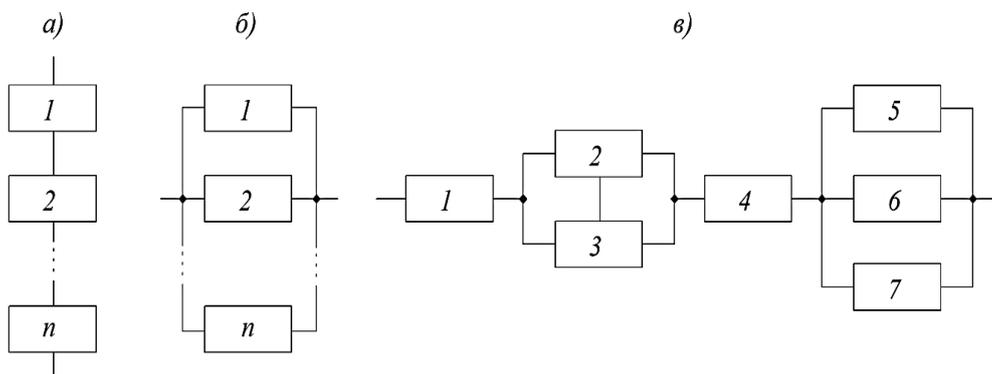


Рис. 5.1. Схемы соединения конструктивных элементов:
а – последовательная; б – параллельная; в – смешанная

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

$$t_c = \max (t_i), i = 1, 2, \dots, n. \quad (5.3)$$

Вероятность безотказной работы системы при параллельном соединении элементов составляет

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (5.4)$$

В реальных технических системах схема соединения конструктивных элементов чаще всего представлена в виде совокупности последовательных и параллельных подсистем (рис. 5.1, в). Такая схема соединения носит название *смешанной*. При расчете надежности такой схемы соединения сначала определяют вероятности безотказной работы ее подсистем, а затем – вероятность безотказной работы всей технической системы. Например, для схемы соединения, показанной на рис. 5.1, в, вероятность безотказной работы составит

$$P(t) = P_1(t) \{1 - [1 - P_2(t)] [1 - P_3(t)]\} \times \\ \times P_4(t) \{1 - [1 - P_5(t)] [1 - P_6(t)] [1 - P_7(t)]\} \quad (5.5)$$

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 в себя гидроагрегат и четыре датчика скорости вращения колес. На рис. 5.2 показана принципиальная (монтажная) схема данной ТС.

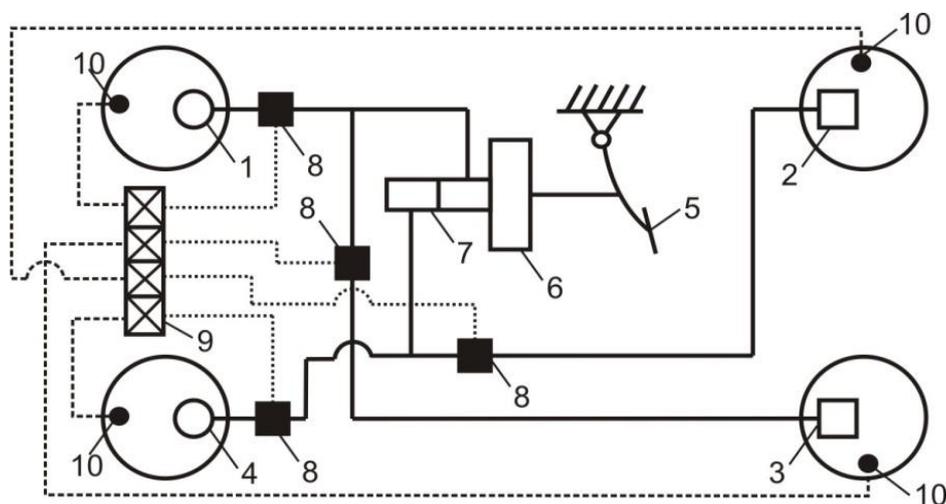


Рис. 5.2. Принципиальная схема тормозной системы автомобиля ВАЗ-21703-01-018: 1, 4 – дисковые тормозные механизмы; 2, 3 – барабанные тормозные механизмы; 5 – педаль; 6 – вакуумный усилитель; 7 – главный тормозной цилиндр; 8 – модулятор; 9 – блок управления АБС; 10 – датчик

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, то на структурной схеме она расположена параллельно основным элементам.

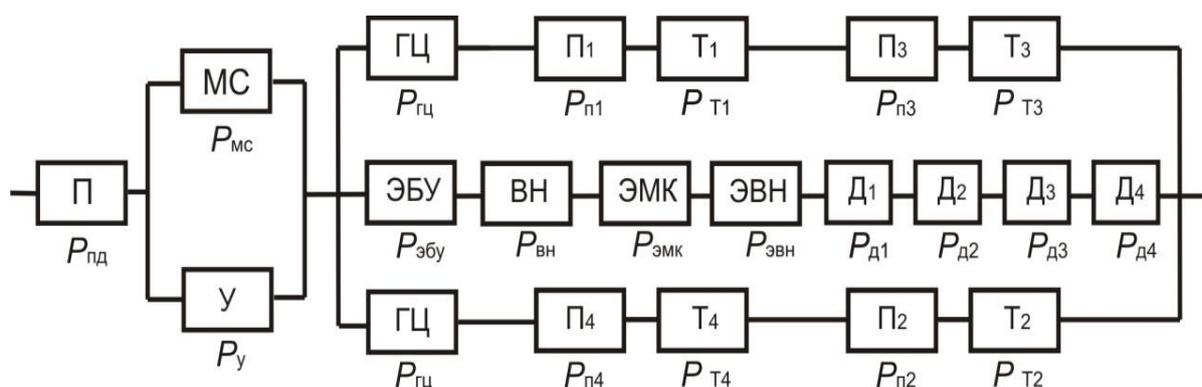


Рис. 5.3. Структурная схема двухконтурной тормозной системы автомобиля ВАЗ-21703-01-018: П – педаль; МС – механическая связь; У – усилитель; ГЦ – главный тормозной цилиндр; ЭБУ – электронный блок управления АБС; ВН – возвратный насос; ЭВН – электродвигатель возвратного насоса; ЭМК – электромагнитные клапаны; Π_i – тормозной привод колеса (рабочий цилиндр с трубопроводом); T_i – тормозной механизм колеса; D_i – датчик угловой скорости колеса совместно с ротором

Для количественной оценки надежности рассматриваемой тормозной системы составляем расчетное уравнение вероятности ее безотказной работы:

$$P_{\text{общ}} = (P_{\text{пд}} (1 - (1 - P_{\text{мс}}) (1 - P_{\text{у}})) \times (1 - [1 - (1 - (1 - P_{\text{гц}} P_{\text{пи}}^2 P_{\text{ти}}^2)^2)] [1 - P_{\text{эбу}} P_{\text{вн}} P_{\text{эмк}} P_{\text{эвн}} P_{\text{ди}}^4])) , \quad (5.6)$$

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; $P_{\text{у}}$ – вероятность безотказной работы усилителя; $P_{\text{гц}}$ – вероятность безотказной работы главного тормозного цилиндра; $P_{\text{пи}}$ – вероятность безотказной работы тормозного привода колеса (рабочий цилиндр с трубопроводом); $P_{\text{ти}}$ – вероятность безотказной работы тормозного механизма; $P_{\text{эбу}}$ – вероятность безотказной работы электронного блока управления; $P_{\text{вн}}$ – вероятность безотказной работы возвратного насоса; $P_{\text{эмк}}$ – вероятность безотказной работы электромагнитных клапанов; $P_{\text{эвн}}$ – вероятность безотказной работы электродвигателя возвратного насоса; $P_{\text{ди}}$ – 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 разделены на категории по допустимой вероятности их отказа или безотказной работы. В 0-й 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).

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	Меньше 0,9	0,88	0,734
		0,89	0,7752
1	Не меньше 0,9	0,9000	0,8059
		0,9400	0,9107
		0,9605	0,9501
		0,9700	0,9649
		0,9800	0,9782
2	Не меньше 0,99	0,9900	0,9897
		0,9950	0,9949
3	Не меньше 0,999	0,9990	0,9989
4	Не меньше 0,9999	0,9999	0,9999
5	1	1	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 машин на надежность

Испытания на надежность – обязательный и неотъемлемый элемент 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 любой технической системы на всех этапах ее жизненного цикла, начиная с разработки проекта и заканчивая утилизацией. Только объективная ин-

формация о фактических показателях надежности машин, причинах и характере возникновения отказов 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. 5.4 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 проводят для углубленного изучения свойств изделий и факторов, влияющих на уровень надежности. К задачам таких испытаний относятся: определение законов распределения 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.

Доводочные и исследовательские испытания – основа 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.

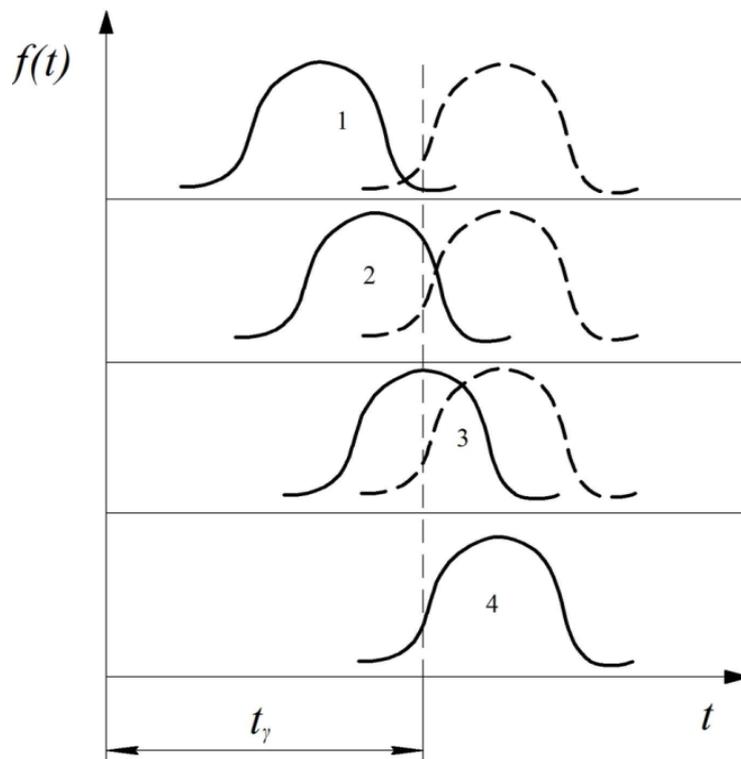


Рис. 5.4. Распределение ресурсов деталей узла:
 — — до доводочных испытаний; - - - — после доводки; t_γ — заданный γ -процентный ресурс узла

Квалификационные (установочные) испытания проводятся для 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 проводят с целью оценки соответствия машин техническим условиям, стандартам и требованиям конструкторской документации. Проверяют стабильность качества изготовления, сборки, регулировок и прочее, надежность (безотказность) изделий в пределах определенной наработки (не менее гарантийной), а также эффективность конструкторских и технологических мероприятий, проведенных 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 — главная проверка как надежно-

сти, так и функциональных свойств любых изделий машиностроения, выявляющая все недостатки, в том числе не проявившиеся в процессе производства и ранее выполненных испытаниях.

Если до начала серийного производства испытаниям подвергают 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 машины данной модели выносят на основании информации о надежности, изучаемой в процессе их эксплуатации.

5.3. Эксплуатационные испытания автомобилей на надежность

Для автомобилей как транспортных средств повышенной опасности предъявляют ужесточенные требования к показателям надежности. В связи с этим испытания автомобилей на надежность имеют некоторую специфику. Их можно подразделить на два основных вида – *дорожные и стендовые*.

Наиболее объективную и исчерпывающую информацию о надежности автомобилей и его 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 специалистов-испытателей не привлекают.

Наибольшее распространение и методическое обеспечение получили испытания в условиях подконтрольной эксплуатации автомобилей. Проводят такие испытания на специально организованных экспериментально-производственных предприятиях, называемых опорными. В подконтрольной эксплуатации используется единая методика сбора, представления и обработки информации, что позволяет получать достоверные оценки показателей надежности машин.

Основные задачи эксплуатационных испытаний:

- 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 автомобилей к проведению ТО и ремонта;
- разработка нормативов поддержания автомобилей в работоспособном состоянии.

В процессе таких испытаний неукоснительно выполняется инструкция по эксплуатации автомобилей, регистрируются все простои и поломки. Все неисправности, отказы фиксируют с указанием их пробега 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 используют 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. 5.5.



Рис. 5.5. Структурная схема экспериментальных исследований по оценке эксплуатационной надежности

Как видно из схемы, важная составляющая экспериментальных исследований по оценке надежности – этап выбора условий 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 другие, 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 фиксируют следующую информацию: 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. Обработку статистической информации можно проводить с помощью специальных программ: Microsoft Excel, STATISTICA и др. Полученные в результате обработки данные анализируют с целью определения элементов, лимитирующих надежность исследуемого узла или агрегата, средних наработок до отказа, основных причин возникновения отказов и неисправностей и т.д.

5.4. 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. Проблема

ускорения и форсирования испытаний на полигонах решается путем воздействия на элементы автомобиля увеличенных нагрузок и сокращения времени.

Обобщение результатов испытаний показывает, что в большинстве случаев базовые детали автомобилей повреждаются не из-за недостаточной статической 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. Испытания автотранспортных средств на таких дорогах сокращают их продолжительность по сравнению с 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. Для увеличения нагрузки на детали 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, 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, подшипники трансмиссии и ступиц колес, шин, уплотнителей вращающихся деталей 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.

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 [3].

Таблица 5.2. **Продолжительность ресурсных полигонных испытаний**

Тип автомобиля	Срок службы до капитального ремонта (списания), годы	Продолжительность полигонных ресурсных испытаний, годы	
		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

Примечание. *Форсирование при полигонных испытаниях осуществляется за счет переменных механических нагружений, коррозионных воздействий, абразивного воздействия в зонах трения и др.

5.5. 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 можно получить информацию, которую не могут дать 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 взаимосвязанно. 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 подвергают 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. 5.6 показана схема современного стенда фирмы «Шенк», на котором одновременно испытывают четыре карданных вала. Такой стенд обеспечивает минимальные затраты энергии, подводимой к нему, благодаря замкнутости силовых контуров.

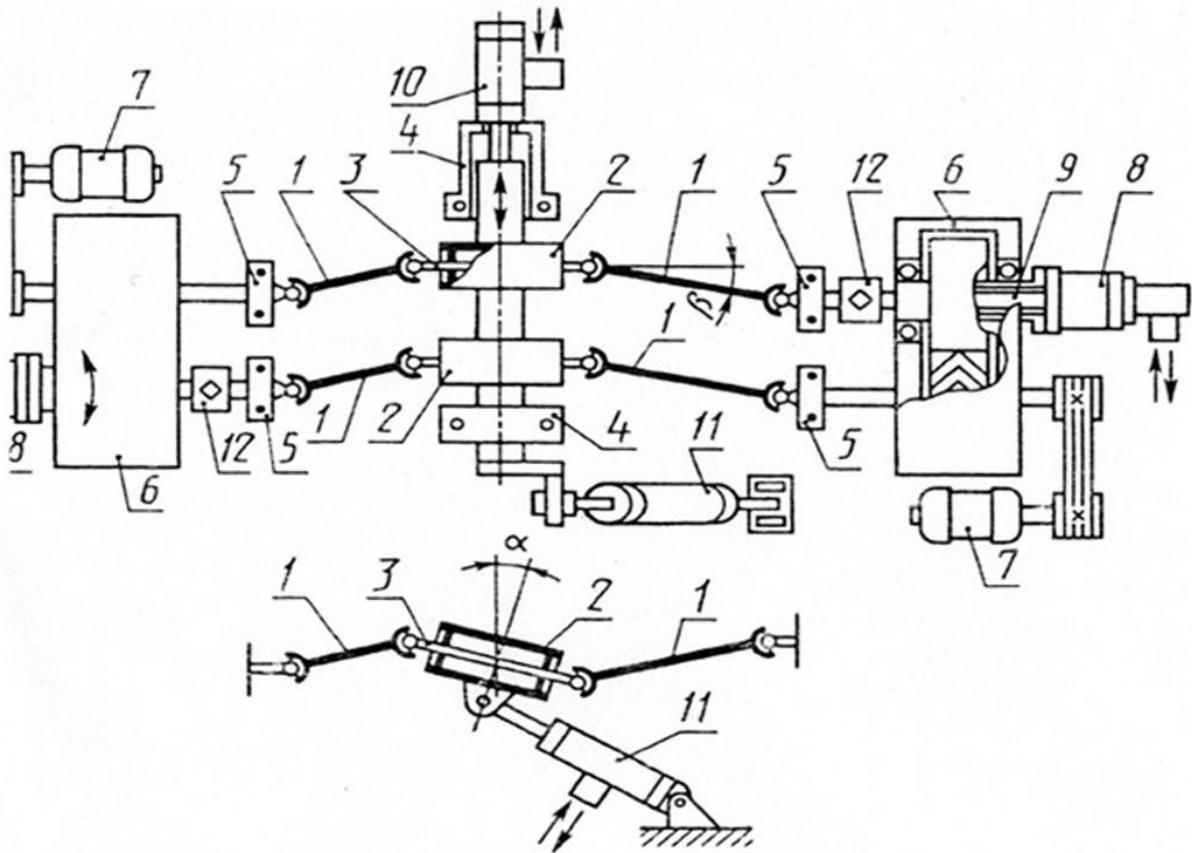


Рис. 5.6. Схема стенда для испытаний карданных валов с программным управлением: 1 – испытываемые валы; 2 – обоймы промежуточных валов; 3 – промежуточные валы; 4 – подшипники цапфы обойм промежуточных валов; 5 – захватные опоры; 6 – зубчатые передачи; 7 – привод вращения; 8 – статор поворотных гидроцилиндров 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

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 в программах 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 пара-

метры надежности расчетным путем. Для оценки надежности сравнительно простых узлов и сопряжений, выпускаемых в серийном или массовом производстве, разработан целый ряд стендов, на которых исследуются долговечность подшипников качения и скольжения, зубчатые передачи, ходовые винты, кулачковые механизмы и т.д.

5.6. Ускоренные испытания

Для сокращения сроков освоения новых моделей автомобилей и экономии средств, идущих на испытания, актуальное 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 выполнения целей и 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 больше сокращается длительность при стендовых испытаниях, но преимущественно по отдельным агрегатам, узлам, деталям. Эффективность этих испытаний проявляется на этапе доводки конструкции. Основные факторы ускорения стендовых испытаний – непрерывность процесса нагружения конструктивных элементов, 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 1,5 – 3 тыс. циклов таких нагружений.

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%-м 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. 5.7 показаны результаты развития коррозионного повреждения по ширине каверны при испытаниях по приведенной методике. Как видно из графика, распространение подпленочной коррозии в зависимости от количества циклов испытаний носит такой же линейный 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 также одна из основных причин загрязнения топлива и смазочного материала.

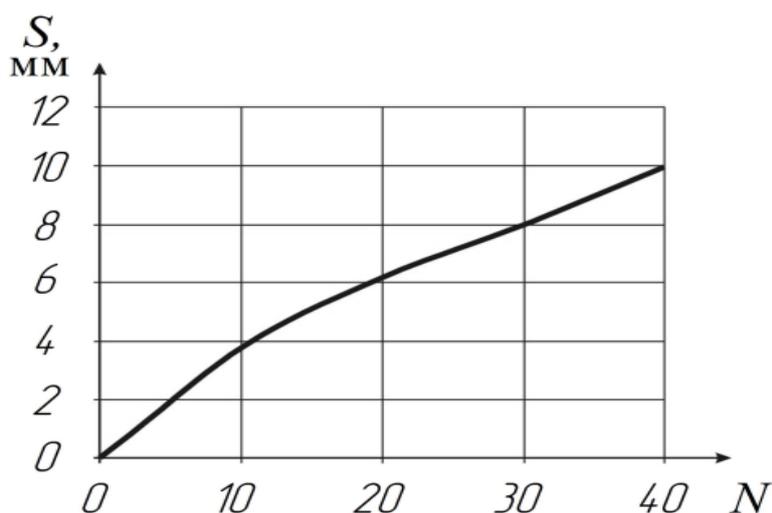


Рис. 5.7. Распространение подпленочной коррозии на передних дверях легкового автомобиля:
 N – число циклов испытаний, S – ширина распространения, мм

Абразивные форсированные испытания автомобилей проводятся в сооружениях с искусственной пылевой средой – пылевой камере. Продолжительность таких испытаний определяется параметрами и характеристиками искусственной среды (характеристиками пыли), скоростью воздушно-пылевого потока и запыленностью воздуха.

Форсированные испытания автомобилей существенно сокращают длительность получения информации о надежности даже по сравнению 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.

5.7. Определение объема выборки испытаний

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 однородностью условий эксплуатации. Однако, как показы-

вает практика, показатели надежности у разных автомобилей будут тем не менее отличаться друг от друга. Объясняется это влиянием большого числа различных факторов: качества изготовления, условий эксплуатации, квалификации водителей и ремонтно-обслуживающего персонала, качества эксплуатационных материалов и т.д. Таким образом, наработка, 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 числа испытуемых объектов. Естественно, при увеличении числа испытуемых изделий повышается точность оценок статистических характеристик изучаемых величин, и при достаточно большом их числе можно получить сколь угодно малую ошибку.

Но, с другой стороны, 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 распространенный метод определения представительной выборки испытаний — метод доверительных интервалов, который заключается в следующем. По предварительным выборочным характеристикам случайной величины, например среднего ресурса \bar{t}_{cp} , находят верхнюю t_B и нижнюю t_H доверительные границы (рис. 5.8). Эти границы и определяют доверительный интервал, который с некоторой доверительной вероятностью α накрывает значение t_{cp} :

$$\alpha = P(t_H \leq \bar{t}_{cp} \leq t_B). \quad (5.7)$$

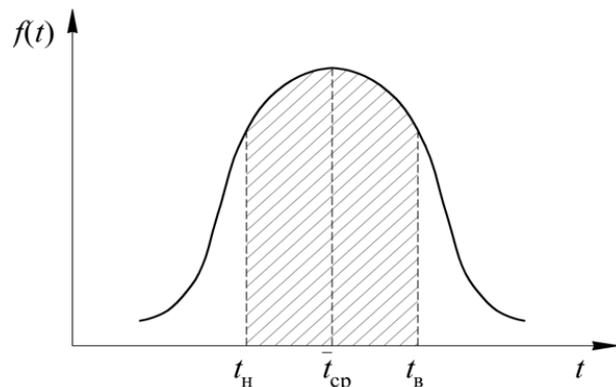


Рис. 5.8. Распределение случайной величины ресурса t с доверительными границами

Ширина доверительного интервала характеризует точность выборочной оценки \bar{t}_{cp} , 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:

$$t_{\text{н}} = \bar{t}_{\text{cp}} - t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad (5.8)$$

$$t_{\text{в}} = \bar{t}_{\text{cp}} + t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (5.9)$$

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 $t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \varepsilon$ представляет собой точность (или абсолютную погрешность) оценки \bar{t}_{cp} . Если требуется определить математическое ожидание наработки (ресурса) \bar{t}_{cp} с наперед заданной точностью ε и достоверностью α , то минимальный объем выборки, который обеспечит эту точность, находят по формуле

$$N = U_p^2 \sigma^2 / \varepsilon^2, \quad (5.10)$$

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

$$\varepsilon = \delta \bar{t}_{\text{cp}}, \quad (5.11)$$

где δ – относительная погрешность (для автотранспортных средств принимается в пределах 5 – 10 %).

Подставляя значение ε в формулу (5.10), получим выражение для минимально необходимого объема выборки испытаний:

$$N = \frac{U_p^2 \sigma^2}{(\delta \bar{t}_{\text{cp}})^2}. \quad (5.12)$$

Таким образом, метод доверительных интервалов позволяет с необходимой точностью и заданной доверительной вероятностью определить представительный объем выборки обследований.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные методы получения информации о надежности машин.
2. Раскройте сущность метода структурных схем при расчете надежности изделий.
3. С какой целью используют резервирование элементов и технических систем?
4. Назовите основные виды испытаний на надежность.
5. Перечислите виды испытаний для оценки надежности автотранспортных 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 проводят полигонные испытания?
10. Какую информацию о надежности получают при стендовых испытаниях?
11. Назовите основные методы и способы ускорения испытаний.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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 применяют *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:

$$\bar{X} = (X_1m_1 + X_2m_2 + \dots + X_k m_k)/n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i m_i, \quad (6.1)$$

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} , определяют 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 $F(x)$ и $P(x)$, а также дифференциальные $f(t)$ функции распределения случайной величины. Для автотранспортной техники в качестве случайной величины чаще всего используют значение наработки t (до 1-го 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 $F(t)$ – неубывающая функция, 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.

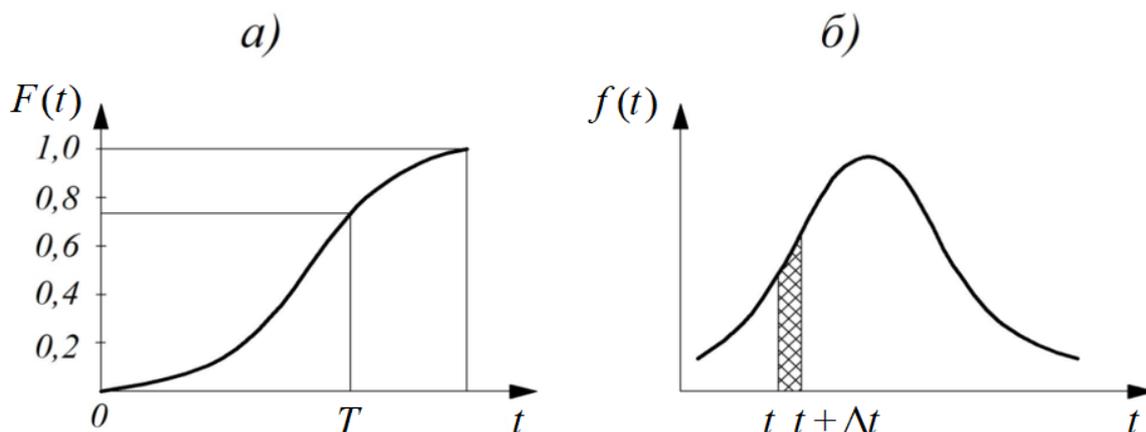


Рис. 6.1. Графическая интерпретация интегральной (а) и дифференциальной (б) функций распределения случайной величины

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 наработке. 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

$$t_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} tf(t)dt. \quad (6.6)$$

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 (наработка деталей с внезапным характером отказов, трудоемкости их устранения, интервалы времени между поступлениями автомобилей в зону ремонта и др.). Графическая интерпретация экспоненциального распределения представлена на рис. 6.2.

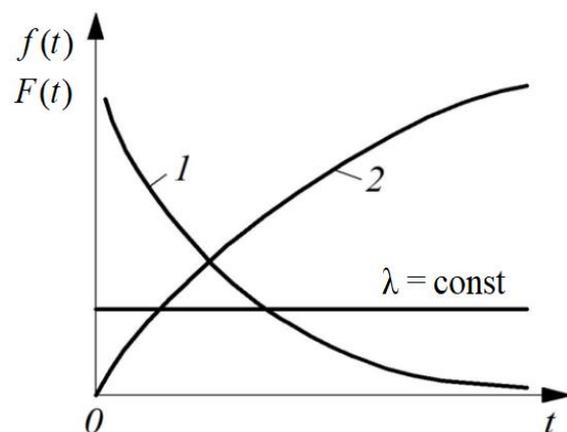


Рис. 6.2. Дифференциальная (1) и интегральная (2) функции экспоненциального распределения

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)

$$t_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.9)$$

Среднее квадратическое отклонение для экспоненциального закона распределения

$$\sigma = t_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.10)$$

Коэффициент вариации

$$v = \frac{\sigma}{t_{\text{ср}}} = 1. \quad (6.11)$$

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. Непрерывная случайная величина t называется нормально распределенной, если плотность ее вероятности имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t - t_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (6.13)$$

где $t_{\text{ср}}$ и σ – параметры нормального распределения (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение).

Нормальный закон является двухпараметрическим распределением с параметрами $t_{\text{ср}}$, 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, то при увеличении σ кривая становится более плоской.

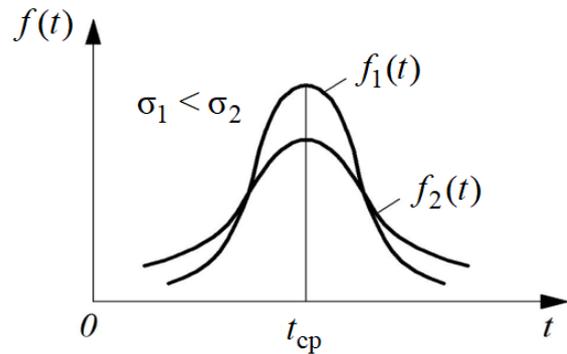


Рис. 6.3. Графическая интерпретация нормального распределения

Интегральная функция нормального распределения описывается выражением

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t - t_{cp})^2}{2\sigma^2}} dt. \quad (6.14)$$

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_{cp} в начало координат. Тогда $t_{cp} = 0$, а среднее квадратическое отклонение $\sigma = 1$. Если ввести новую переменную $z = \frac{t - t_{cp}}{\sigma}$, 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:

$$F(-\infty) = 0; F(+\infty) = 1; F(z) - \text{неубывающая функция.}$$

Кроме того, в связи с симметричностью этого распределения с параметрами $t_{cp} = 0$ 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 можно вычислить по формулам:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} f_0\left(\frac{t - t_{cp}}{\sigma}\right), \quad (6.18)$$

$$F(t) = F_0\left(\frac{t - t_{cp}}{\sigma}\right). \quad (6.19)$$

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 $\Phi(z)$ так же, 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

$$P(t_1 < t < t_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{t_2 - \bar{t}_{cp}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - \bar{t}_{cp}}{\sigma}\right). \quad (6.21)$$

Вероятности отказа и безотказной работы с использованием функции Лапласа определяются из выражений:

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{cp}}{\sigma}\right), \quad P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{cp}}{\sigma}\right). \quad (6.22)$$

Нормальный закон распределения хорошо описывает процессы, на которые влияет большое число независимых факторов, ни один из них не имеет преобладающего влияния. Ему подчиняются износные отказы, ресурсы агрегатов и отдельных деталей, люфты и зазоры в соединениях, 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).

Параметры y_0 и $\sigma_{\text{л}}$ связаны с математическим ожиданием $t_{\text{ср}}$ и средним квадратическим отклонением σ случайной величины t следующими соотношениями:

$$t_{\text{ср}} = e^{y_0 + \frac{\sigma_{\text{л}}^2}{2}}; \quad (6.24)$$

$$\sigma = \sqrt{e^{2y_0 + \sigma_{\text{л}}^2} (e^{\sigma_{\text{л}}^2} - 1)}. \quad (6.25)$$

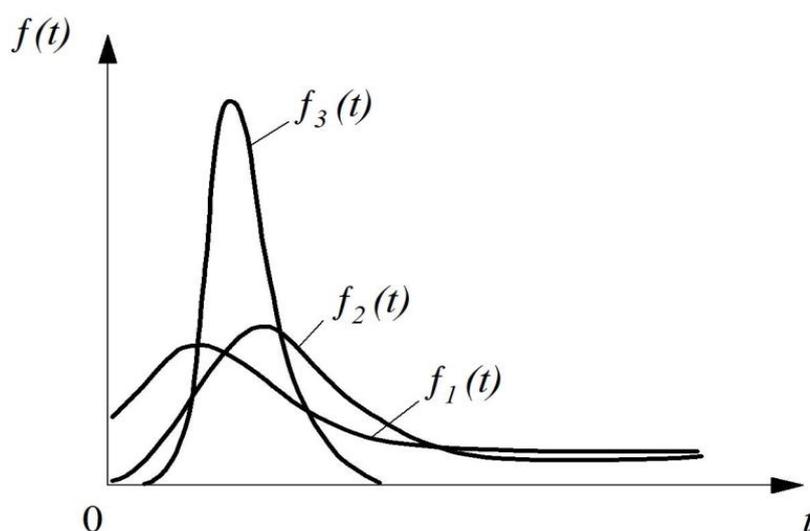


Рис. 6.4. Графическая интерпретация дифференциальной функции $f(t)$ логарифмически нормального распределения ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)

При решении практических задач определения показателей надежности так же, как и для нормального распределения прибегают к центрированию и нормированию распределения, т.е. вводу новой переменной $z = \frac{\ln t - y_0}{\sigma_0}$. 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 наработки 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

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} \quad \text{при } t > 0, \quad (6.29)$$

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. Явно 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 распределение 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).

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 которыми параметры распределения определяются по формулам:

$$t_{cp} = ak_B; \quad \sigma(t) = aq_B, \quad (6.30)$$

где k_B и q_B – коэффициенты, определяемые из выражений:

$$k_B = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad q_B = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - k_B^2}, \quad (6.31)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция, значения которой протабулированы и приведены в таблицах математической статистики.

Коэффициент вариации случайной величины t определяется по формуле

$$v = \frac{\sigma}{t_{cp}} = \frac{aq_B}{ak_B} = \frac{q_B}{k_B}. \quad (6.32)$$

Из математической статистики известно, что параметр формы распределения Вейбулла b является функцией коэффициента вариации v :

$$b = f(v) = f\left\{\frac{\sigma(t)}{t_{cp}}\right\}.$$

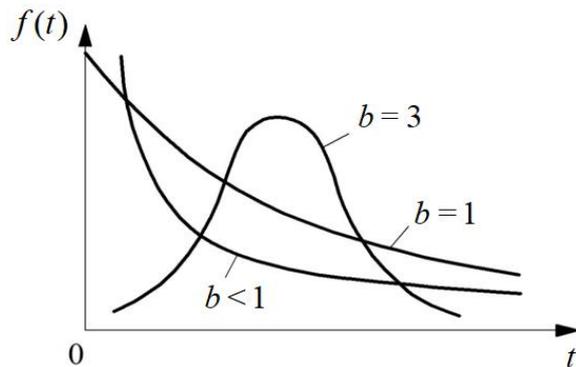


Рис. 6.5. Кривые дифференциальной функции $f(t)$ распределения Вейбулла в зависимости от параметра формы b

Для удобства вычислений при определении параметра формы b , а также коэффициентов k_b и q_b в зависимости от коэффициента вариации v в работах по математической статистике имеются специальные таблицы (для некоторых значений коэффициента v они приведены в табл. 6.1).

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

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}. \quad (6.34)$$

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

6.3. Статистическая обработка информации о надежности

В первичной документации, где фиксируются результаты испытаний на надежность, содержатся данные, в которых трудно усмотреть какой-либо порядок и закономерности. Обработку этих данных начинают с составления таблицы, в которой их располагают в порядке увеличения полученных при испытаниях значений. Дальнейшую обработку статистической информации проводят в определенной последовательности.

Находят границы рассеивания опытных данных, т.е. наибольшее t_{\max} и наименьшее t_{\min} их значения. Разность между ними является размахом варьирования

$$R = t_{\max} - t_{\min}. \quad (6.35)$$

Обосновывают 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.

Находят ширину интервала вариационного ряда

$$h = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k} = \frac{R}{k}. \quad (6.37)$$

Определяют границы интервалов, для чего вначале устанавливается нулевое (крайнее) значение интервала

$$t_0 = t_{\min} - h/2. \quad (6.38)$$

Следующие границы интервалов рассчитывают последовательным прибавлением величины интервала h к предыдущему значению, т.е.

$$t_1 = t_0 + h; \quad t_2 = t_1 + h; \quad \dots; \quad t_k = t_{k-1} + h.$$

В каждом интервале определяют его середину

$$\bar{t}_i = \frac{t_i + t_{i+1}}{2}. \quad (6.39)$$

Находят 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 отклонений (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}_{cp} 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}_{cp} , среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации v .

Определяют опытные частоты w_i , отражающие вероятности попадания случайной величины t в заданные интервалы наработок

$$w_i = \frac{\bar{m}_i}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (6.40)$$

Найденные значения опытных частот w_i представляют графически в виде гистограммы. По оси абсцисс гистограммы откладывают интервалы наработок и на их основании строят прямоугольники, высоты которых соответствуют частотам w_i . На рис. 6.6 в качестве примера приведена гистограмма распределения наработок свечей зажигания до отказа, построенная по результатам эксплуатационных наблюдений.

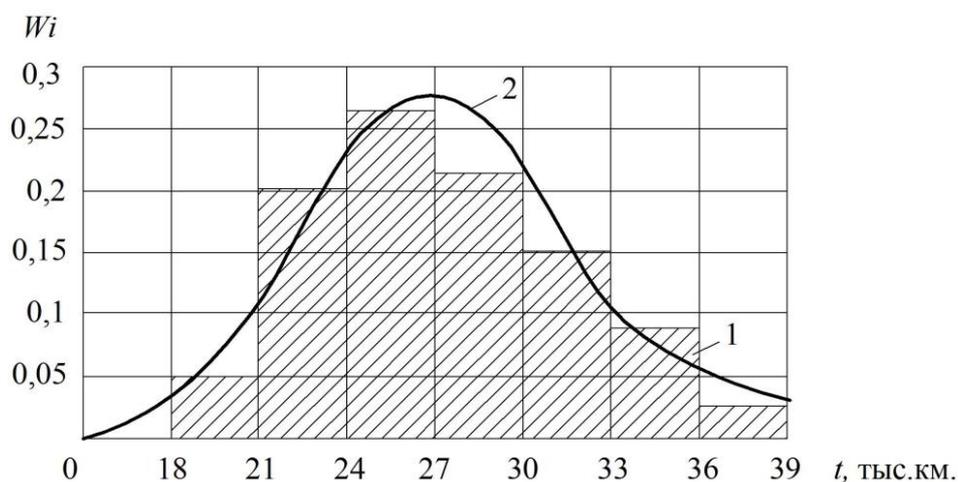


Рис. 6.6. Гистограмма 1 и теоретическая кривая распределения 2 значений наработки свечей зажигания до отказа

В связи с ограниченностью объема выборки обследований в полученном распределении в той или иной мере присутствуют элементы

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 имеются современные компьютерные программы (STATISTICA, Microsoft Excel и др.), выполняющие эти операции с графическим представлением гистограмм и дифференциальных функций $f(t)$. В приведенном на рис. 6.6 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 коэффициента 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, которая выполняется с помощью соответствующих «критериев согласия». Для проверки правдоподобия гипотезы о принадлежности результатов испытаний по надежности машин выбранному закону распределения чаще всего используют критерий χ^2 Пирсона, который записывается в виде альтернативного условия

$$\chi_{\text{опыт.}}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i} = \begin{cases} \leq \chi_{\text{табл.}}^2 \left(\begin{matrix} \alpha \\ S \end{matrix} \right) \\ > \chi_{\text{табл.}}^2 \left(\begin{matrix} \alpha \\ S \end{matrix} \right) \end{cases}, \quad (6.41)$$

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.

Уровень значимости α представляет собой вероятность того, что величина $\chi_{\text{опыт.}}^2$ в результате случайных отклонений частот опытного распределения от соответствующих частот теоретического распределения будет меньше табличного значения $\chi_{\text{табл.}}^2$.

Число степеней свободы определяют из выражения

$$S = k - r - 1, \quad (6.42)$$

где r – число параметров теоретического закона распределения.

Значения $\chi_{\text{табл.}}^2$ в зависимости от наиболее распространенных в инженерных задачах уровней значимости α и числа степеней свободы S приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2. 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 проводят 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].

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за 41 автомобилем средней грузоподъемности были получены следующие наработки до отказа элементов системы освещения в тысячах километров: 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 Microsoft 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. 6.7), и по ее виду, а также значению коэффициента вариации $v = 0,80$ предполагаем, что распределение наработок до отказа подчиняется экспоненциальному закону.

4. Определяем интенсивность отказов $\lambda = 1/t_{cp} = 0,0351$ тыс. км⁻¹.

5. Рассчитываем вероятности попадания наработок до отказа t в каждый из интервалов (вероятность усеченного распределения):

$$p_{iy} = P(t_i < \bar{t}_i < t_{i+1}) = e^{-\lambda t_i} - e^{-\lambda t_{i+1}}$$

$$p_{1y} = 0,409; p_{2y} = 0,241; p_{3y} = 0,143; p_{4y} = 0,088; p_{5y} = 0,052;$$

$$p_{6y} = 0,026; p_{7y} = 0,018.$$

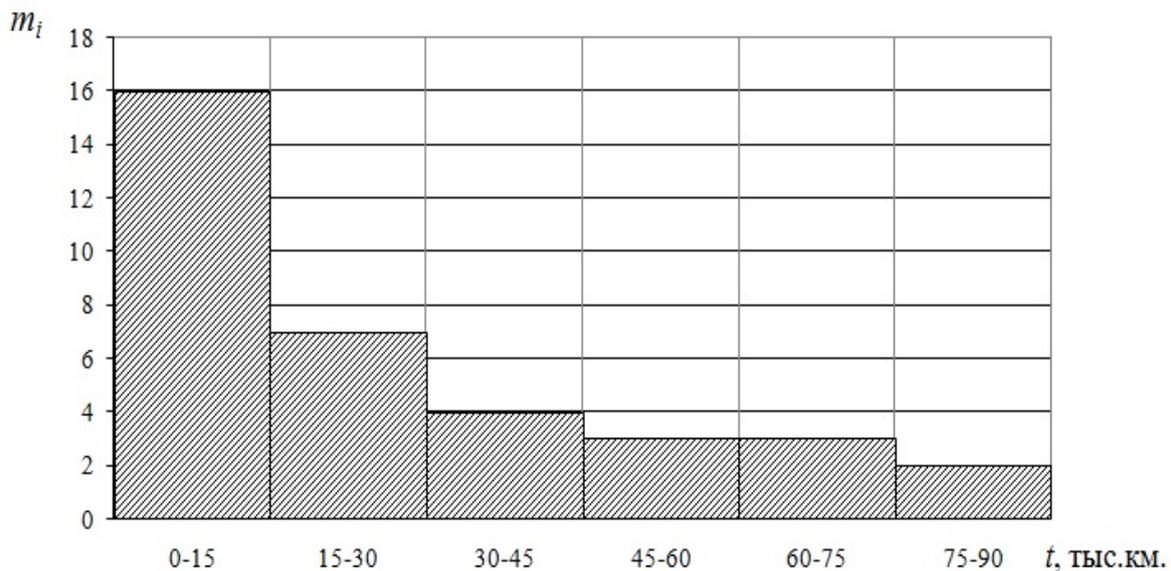


Рис. 6.7. Гистограмма распределения наработок элементов системы освещения до отказа

6. Определяем нормирующий множитель

$$C = 1 / \sum_{i=1}^7 p_i = 1 / 0,977 = 1,024.$$

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 рассчитываем значение критерия согласия χ^2 Пирсона. Расчеты сводим в табл. 6.3.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $S = k - r - 1 = 7 - 1 - 1 = 5$ табличное значение $\chi^2_{\text{табл.}} = 11,1$. Так как $\chi^2_{\text{опыт.}} < \chi^2_{\text{табл.}}$, гипотеза о распределении наработок до отказа элементов системы освещения по экспоненциальному закону не отвергается.

10. Определяем значения интегральных функций распределения отказов $F(t)$ и вероятностей безотказной работы $P(t)$ по интервалам наработки (табл. 6.4).

Таблица 6.3. 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				$\chi^2_{\text{опыт.}} = 1,230$

Таблица 6.4. 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

11. Используя найденные по интервалам наработки значения $F(t_i)$ и $P(t_i)$, строим графики интегральных функций распределения отказов и вероятности безотказной работы (рис. 6.8).

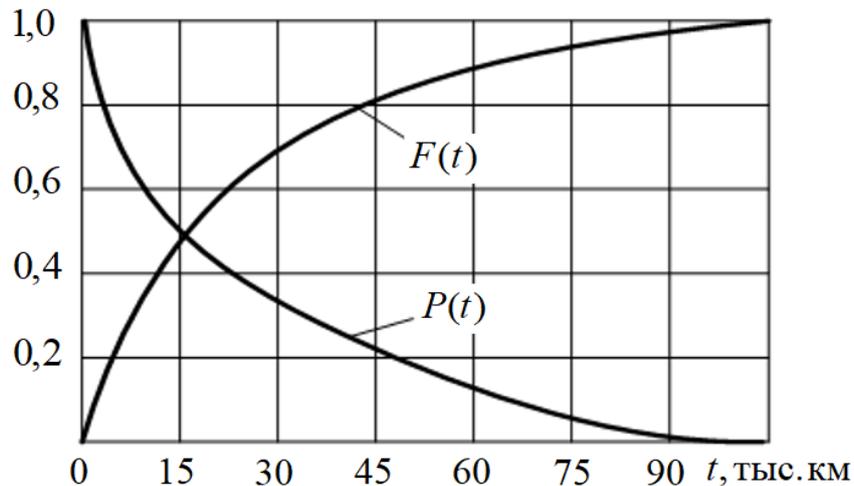


Рис. 6.8. Графики интегральных функций распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t)$

6.4. Обработка информации о надежности по результатам незавершенных испытаний

При испытаниях на надёжность нередко возникают ситуации, когда к моменту анализа информации не все изделия доведены до предельного состояния. Часть изделий в партии обследования остаётся работоспособной и, естественно, содержит в себе определённую информацию о реальных показателях надёжности. В этом случае мы имеем дело с незавершёнными 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 другие причины.

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 установ-

лены, так как испытания этих автомобилей были приостановлены по различным причинам. В этом случае оценка показателей надёжности 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 надёжности проводится на основе *прогнозирования отказов* с учётом 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.

Так же, как и при завершённых испытаниях определяют число интервалов наработки и их границы. Составляют таблицу распределения наработок отказавших и неотказавших из-за приостановки испытаний изделий по интервалам группировки. Вероятность отказа к концу интервала с учётом неотказавших изделий определяют по формуле

$$F(t) = \frac{m_i}{N + 1}, \quad (6.43)$$

где N – общее количество изделий в выборке; m_i – прогнозируемое количество отказов к концу i -го интервала с учётом неотказавших из-за приостановки испытаний изделий, которое определяется по формуле

$$m_i = m_{(i-1)} + k_i n_i, \quad (6.44)$$

где $m_{(i-1)}$ – прогнозируемое число отказов в интервале $(i - 1)$; n_i – количество отказавших изделий в i -м интервале; $k_i n_i$ – прогнозируемое количество отказов в i -м интервале; k_i – коэффициент приращения количества отказов в i -м интервале наработки, который определяется по формуле

$$k_i = \frac{N + 1 - m_{(i-1)}}{N + 1 - \sum g_i - \sum n_{(i-1)}}, \quad (6.45)$$

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

$$k_2 = \frac{N+1-m_1}{N+1-\sum_1^2 g_i - n_i}; \quad m_2 = m_1 + k_2 n_2 \text{ и т.д.}$$

Рассмотрим изложенный метод обработки информации о надежности на конкретном примере.

Пример. При проведении эксплуатационных испытаний из выборки объемом 40 автомобилей 10 были сняты с испытаний по разным причинам, не относящимся к отказам тормозных накладок. Нарботки до отказа накладок оставшихся 30 автомобилей: 42, 49, 53, 49, 54, 47, 44, 32, 57, 51, 67, 72, 39, 48, 56, 35, 41, 59, 76, 27, 58, 36, 64, 44, 52, 47, 55, 43, 45, 62 тыс. км. По остальным 10 автомобилям испытания были приостановлены на следующих наработках с начала эксплуатации: 36, 42, 45, 53, 55, 57, 62, 64, 67, 74 тыс. км. Требуется определить показатели надёжности тормозных накладок с учётом снятых с испытаний автомобилей.

По формулам (6.43), (6.44), (6.45) рассчитываем значения k_i , m_i , $F(t_i)$ по интервалам наработки.

Для первого интервала

$$k_1 = \frac{40+1}{40+1-0-0} = 1; \quad m_1 = 1 \cdot 1 = 1; \quad F(t_1) = \frac{1}{40+1} = 0,024.$$

Для второго интервала

$$k_2 = \frac{40+1-1}{40+1-1-1} = 1,026; \quad m_2 = 1 + 1,026 \cdot 4 = 5,104; \quad F(t_2) = \frac{5,104}{41} = 0,124.$$

Для третьего интервала

$$k_3 = \frac{40+1-5,104}{40+1-3-5} = 1,088; \quad m_3 = 5,104 + 1,088 \cdot 11 = 17,072; \quad F(t_3) = \frac{17,072}{41} = 0,416.$$

Таким же образом рассчитываем k_i , m_i , $F(t_i)$ для остальных интервалов наработки и результаты сведём в табл. 6.5. После того как определено прогнозируемое количество отказов m_i по интервалам наработки, дальнейшая обработка информации проводится так же, как и при завершённых испытаниях.

Таблица 6.5. Результаты обработки информации при незавершенных испытаниях

Интервал наработки, тыс. км	n_i	Σn_i	g_i	Σg_i	k_i	$k_i n_i$	m_i	$F(t_i)$	$P(t_i)$
20 – 30	1	1	–	–	1,000	1,000	1,000	0,024	0,976
30 – 40	4	5	1	1	1,026	4,103	5,104	0,124	0,876
40 – 50	11	16	2	3	1,088	11,966	17,072	0,416	0,584
50 – 60	9	25	3	6	1,260	11,336	28,404	0,693	0,307
60 – 70	3	28	3	9	1,799	5,398	33,803	0,824	0,176
70 – 80	2	30	1	10	2,899	4,798	38,601	0,941	0,059

По найденным значениям $F(t_i)$ и $P(t_i)$ строим соответствующие графики функций (рис. 6.9).

Прогнозируемый средний ресурс тормозных накладок с учётом снятых с испытаний автомобилей составит

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k t_i (k_i n_i) = \frac{1}{40} \{25 \cdot 1 + 35 \cdot 4,103 + 45 \cdot 11,966 + 55 \cdot 11,336 + 65 \cdot 5,398 + 75 \cdot 4,798\} = 51,032 \text{ тыс. км.}$$

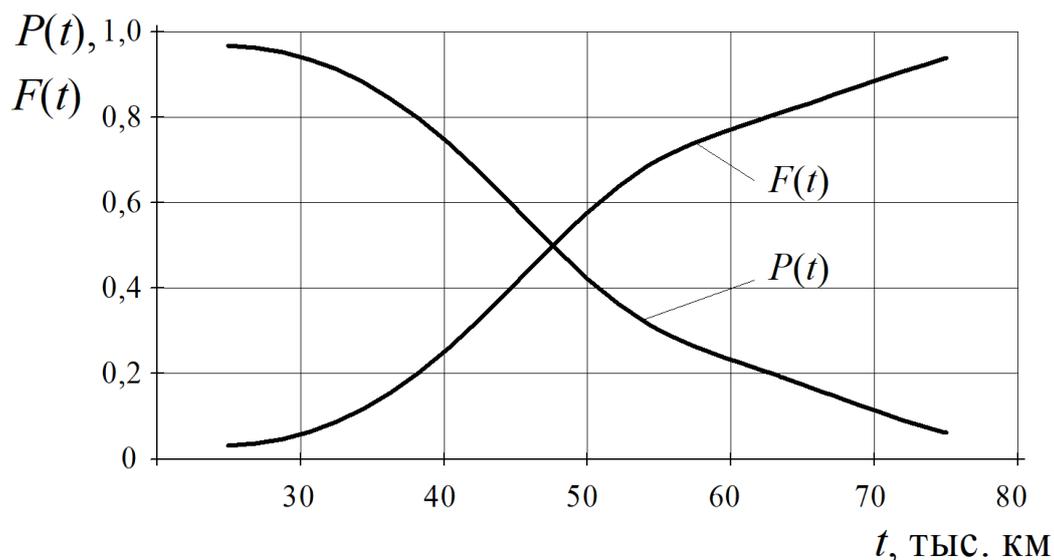


Рис. 6.9. Графики функций вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ тормозных накладок автомобиля

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные числовые характеристики распределения случайной величины наработки.
2. Что понимают 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. Назовите параметры нормального и экспоненциального законов распределения.
7. Какие отказы описываются нормальным законом распределения?
8. Что понимают под центрированием и нормированием нормального распределения?
9. Какие отказы описываются распределением Вейбулла?
10. Приведите порядок обработки информации о надежности.
11. Как определяются параметры статистического ряда распределения: размах выборки R , число интервалов k и величину интервала h ?
12. Как изменяются по наработке плотность распределения $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ для распределения Вейбулла?
13. Постройте графики интегральной функции распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t)$ для экспоненциального и нормального законов распределения.
14. Как проверяется гипотеза о принадлежности опытных данных выбранному распределению с помощью критерия согласия χ^2 ?
15. Как определяют показатели надежности при незавершенных испытаниях?

Глава 7

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

Одна из главных задач инженерно-технической деятельности при разработке и проектировании продукции машиностроения – создание конкурентоспособных машин. При этом среди многих факторов, определяющих качество и соответственно конкурентоспособность машин, особое место следует отвести их 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 первую очередь с позиций экономики, так как экономика 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):

$$C_{уд}(t) = C_{пр}(t) + C_э(t), \quad (7.1)$$

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

Удельные приведенные затраты на приобретение машины, включающие в себя проектирование, испытания, производство, транспортировку и другое, определяются соотношением ее цены Π и ресурса $T_э$:

$$C_{пр}(t) = \Pi / T_э. \quad (7.2)$$

Средние удельные затраты на эксплуатацию машины, связанные с поддержанием её работоспособного состояния и расходами на эксплуатационные материалы за ресурс T_3 , определяются выражением

$$C_3(t) = \frac{C_{\text{ТО}} + C_{\text{ТР}} + C_{\text{ЭМ}} + C_{\text{Зч}} + C_{\text{ОТ}}}{T_3}, \quad (7.3)$$

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 затраты, необходимые для обеспечения надежности машин. Это связано с тем, что 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 $C_{\text{пр}}(t)$.

С другой стороны, 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. 7.1.

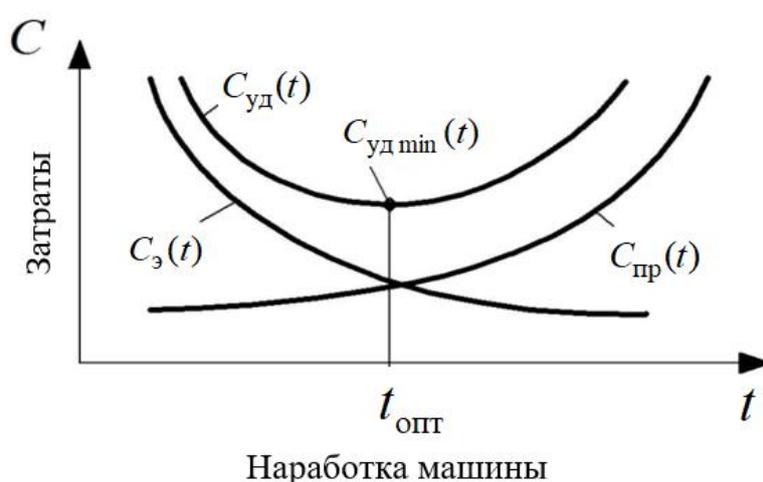


Рис. 7.1. Схема обоснования оптимального уровня надежности машины

Таким образом, с увеличением уровня надежности машины удельные приведенные затраты, связанные с приобретением машины $C_{пр}(t)$, растут, так как требуют дополнительных капиталовложений. Но при этом средние приведенные затраты на ее эксплуатацию $C_э(t)$, наоборот, имеют тенденцию к снижению. В связи с этим кривая суммарных удельных приведенных затрат $C_{уд}(t) = C_{пр}(t) + C_э(t)$ на какой-то наработке имеет минимум, который и соответствует оптимальному уровню надежности

$$C_{уд}(t) = \min[C_{пр}(t) + C_э(t)]. \quad (7.4)$$

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.

Разработка машин включает в себя несколько этапов: проектирование; конструирование; изготовление опытного образца, его испытание и доводку; постановку на серийное производство; серийное производство.

Проектирование представляет собой процесс разработки машин на уровне чертежей, который включает в себя:

- техническое задание на создание машины, где сформулированы основные требования к надежности и технико-экономические показатели;

- эскизный проект, в котором анализируются требования к надежности, выбираются схемные и конструктивные решения, определяются требования к надежности сборочных единиц, выполняется предварительный расчет надежности изделия в целом;
- технический проект, включающий в себя выбор оптимального варианта конструкции, 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, 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. 7.2.



Рис. 7.2. 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.

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

Одно из основных условий обеспечения высокой надежности машин на стадии проектно-конструкторских работ – оптимизация структурной схемы машины и состава её основных частей. Эта стадия проектирования носит название *компоновки* машины.

С позиции надежности оптимальным 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 числа 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 доводке 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 могут быть отдельная деталь, сопряжение, сборочная единица, механизм, агрегат.

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.

7.1.2. Рациональный выбор материалов деталей пар трения

Для изготовления деталей машин и их конструктивных элементов используются самые различные материалы с повышенными механическими характеристиками, так как постоянно растут требования к их надежности. Для конкретного конструктивного элемента выбирают материал с учетом обеспечения его максимальной долговечности и возможностью применения наиболее эффективной и экономичной технологии изготовления. Кроме того, необходимо учитывать условия работы деталей узла трения, действующие на них нагрузки, вид изнашивания.

Основные материалы, используемые в современном автомобилестроении, – 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 блока двигателя. Обработанные хонингованием внутренние поверхности цилиндров чугунных блоков обладают высокими антифрикционными свойствами и износостойкостью.

Достаточно сложная задача при конструировании машин – подбор износостойких материалов для деталей узлов трения. Рациональный выбор материалов должен гарантировать, что при нормальных условиях работы не возникнут недопустимые виды изнашивания (например, молекулярное схватывание). При выборе таких материалов к ним наряду с высокой износостойкостью предъявляют 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 (коленчатые и распределительные валы, шатуны, валы карданных передач и др.), наряду с перечисленными требованиями дополнительно предъявляют требования высокой *усталостной прочности и ударной вязкости*. Материалы деталей, работающих в условиях высоких удельных нагрузок (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 самые разнообразные антифрикционные материалы (рис. 7.3).

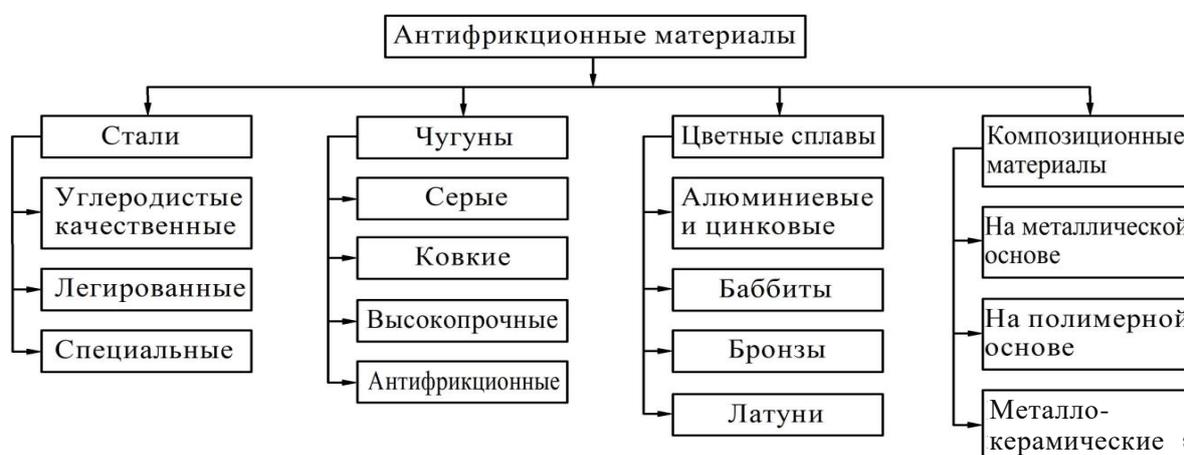


Рис.7.3. Антифрикционные материалы, используемые в узлах трения

При производстве автомобилей наиболее распространенным материалом в узлах трения так же, как и в большинстве деталей до настоящего времени 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, клапаны, 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 применяют 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 другие применяют в автомобилестроении 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 большого числа 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, привела 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. 7.4).

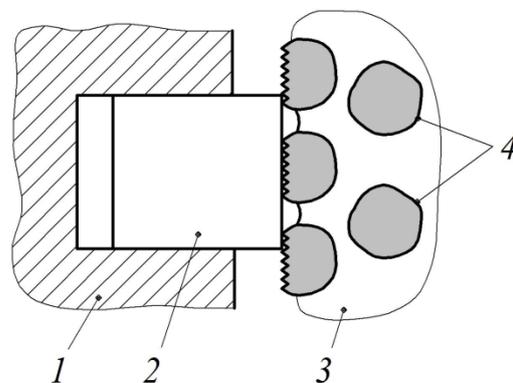


Рис. 7.4. Схема взаимодействия поршневого кольца с рабочей поверхностью цилиндра: 1 – поршень; 2 – поршневое кольцо; 3 – цилиндр блока из алюминиевого сплава; 4 – кристаллы кремния

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, предъявляют ряд специфических 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 *баббиты* – сплавы на свинцовой и оловянной основе с добавлением меди, сурьмы и других элементов; *оловянистые и свинцовистые бронзы*; *антифрикционные чугуны*; *сплавы на цинковой и алюминиевой основе*.

В современном автомобилестроении широкое распространение получили многослойные подшипники скольжения. Основа вкладыша в них – стальная лента, а рабочий слой – 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 различных по химическому составу и структуре компонентов, – достаточно перспективные материалы для деталей пар трения. Они состоят из матрицы, являющейся связующим материалом, и частиц различных наполнителей, в качестве которых используют 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.

Основа неметаллических композиционных материалов – полимеры. *Полимерные материалы* широко используются при производстве современных автомобилей. Они вытесняют сталь, чугун и цветные металлы из двигателя, шасси и кузова. Уже сейчас при производстве, например легковых автомобилей, из полимерных материалов изготавливается 12 – 13 % деталей. Применение полимерных материалов позволяет не только существенно уменьшить массу автомобиля, но и повысить его надежность и долговечность.

Механические свойства полимерных материалов обеспечиваются за счет использования в качестве наполнителя тканей стекловолокон, стеклянных нитей, углеродных волокон, специальных порошков и т.д. Из них выполняют подшипники скольжения, зубчатые колеса, шкивы, втулки, кулачковые механизмы.

Металлокерамические материалы используют 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, характерные 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, – одно из направлений повышения их надежности.

На рис. 7.5 показана графическая интерпретация изменения ресурса узла трения после модернизации его геометрической формы. В результате, как следует из схемы, продолжительность периода приработки $t_{пр}$ уменьшилась до значения $t'_{пр}$, а ресурс T_p существенно увеличился (T'_p).

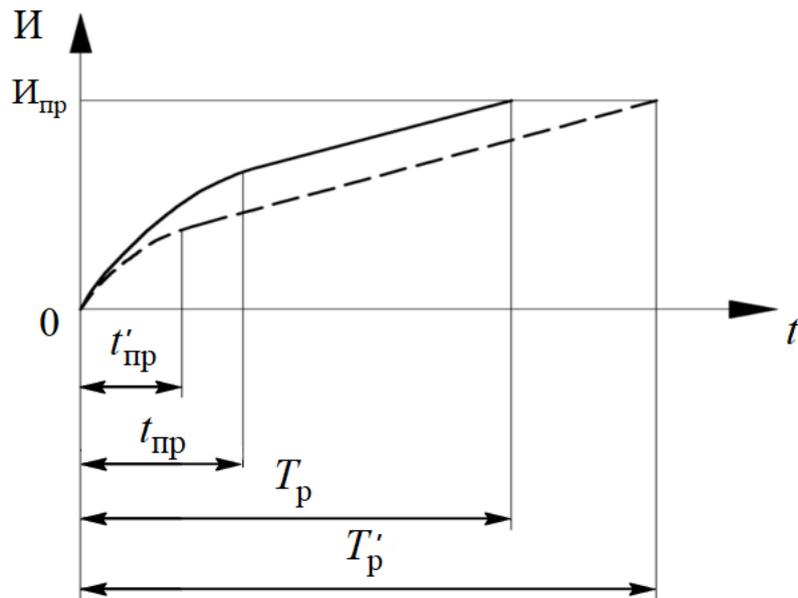


Рис. 7.5. Схема изменения процесса изнашивания в результате изменения геометрической формы

Изменением формы коленчатых валов, клапанов, поршней, блока цилиндров и других деталей можно повысить 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 деталей

Для обеспечения нормальных условий работы деталей прежде всего необходимо 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 оказывают 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 происходит 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 микро-частиц 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, – одно 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.

Ремонтопригодность автомобиля определяется его контролепригодностью, доступностью, легкоъемностью, 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.

Легкоъемность – 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 ремонтнопригодности устанавливает комплекс взаимосвязанных организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение заданных требований к ремонтнопригодности. При конструировании автомобилей они должны отвечать ряду требований к эксплуатационной и ремонтной технологичности, основными из которых можно назвать:

- 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, должны быть сконструированы таким образом, чтобы к ним был обеспечен хороший доступ для контрольных и регулировочных работ, а при достижении предельного износа – возможна быстрая замена;
- для деталей с прессовой или переходной посадкой в их конструкции целесообразно предусмотреть специальные приливы, пазы или резьбовые отверстия, позволяющие при разборке применять простейший демонстрационный 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. 7.6, а), например, включающий фильтры грубой 1 и тонкой 2 очистки, показывает, что при засорении (отказе) любого из них нарушается подача топлива. Такое соединение конструктивных элементов, когда отказ одного из них вызывает отказ системы в целом, называется последовательным.

Если вероятности безотказной работы каждого из фильтров в пределах заданной наработки равны P_1 и P_2 , то вероятность безотказной работы системы очистки топлива в целом определяется из выражения

$$P(t) = P_1 P_2. \quad (7.1)$$

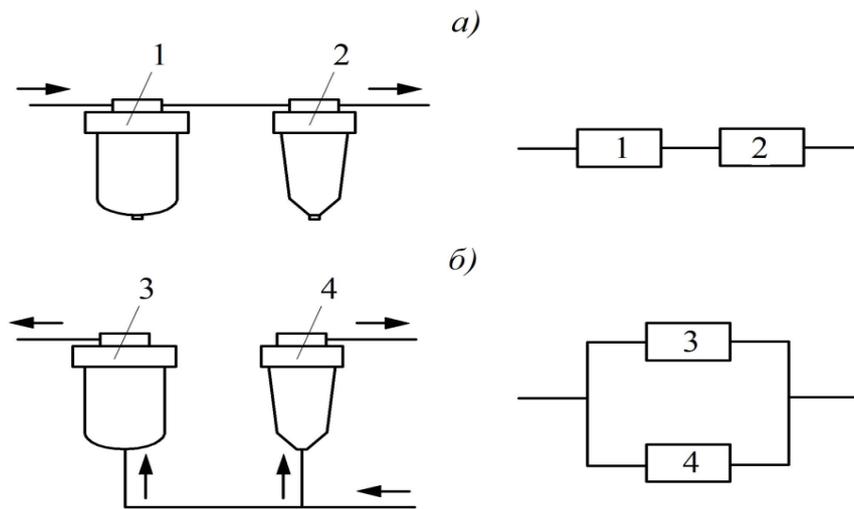


Рис. 7.6. Схемы соединения фильтров:
 а – в системе питания; б – в системе смазки

Соединение масляных фильтров грубой 3 и тонкой 4 очистки системы смазки двигателя конструктивно выполнено по другой схеме (рис. 7.6, 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 таком 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 возможны 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 и удорожанию системы. 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 оборудуют запасными тормозными системами, которые включаются в работу при отказе рабочей системы. 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, включающие в себя секции главного тормозного цилиндра и колесные цилиндры, могут быть различными. На рис 7.7, *a* 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. 7.7, *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.

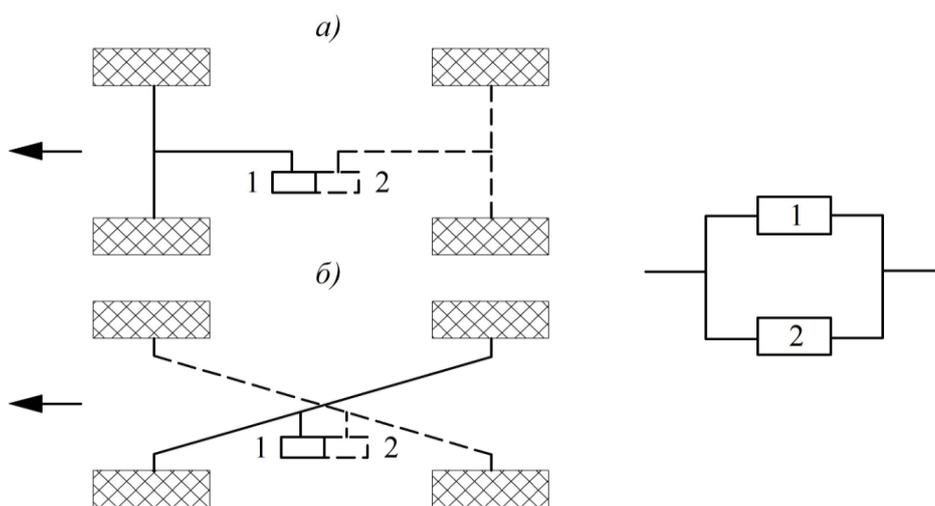


Рис. 7.7. Схемы тормозных систем с осевым (*a*) и диагональным (*б*) разделением контуров: 1 – контур, объединяющий первую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы колес; 2 – контур, объединяющий вторую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы колес

Такие структурные схемы соединений тормозной системы являются параллельными. Если принять условно вероятности безотказной работы обоих контуров равными $P_1 = P_2 = 0,9$, то вероятность безотказной работы тормозной системы $P(t)$ составит

$$P(t) = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = 0,99.$$

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. 7.8 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.

Вероятность безотказной работы тормозной системы, выполненной по такой схеме раздельного резервирования, определяются из выражения

$$P(t) = [1 - (1 - P_1)^2] P_2 = 0,891.$$

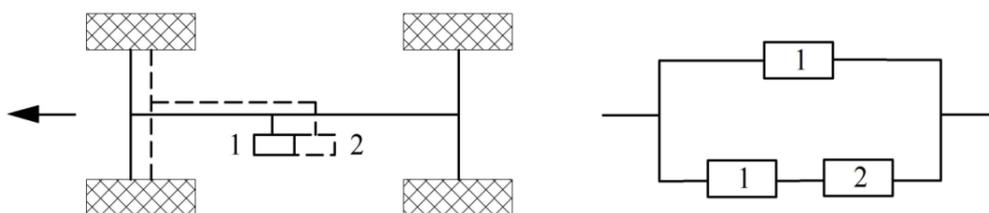


Рис. 7.8. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура: 1 – контур, объединяющий первую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы всех колес; 2 – контур, объединяющий вторую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы передних колес

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. 7.9).

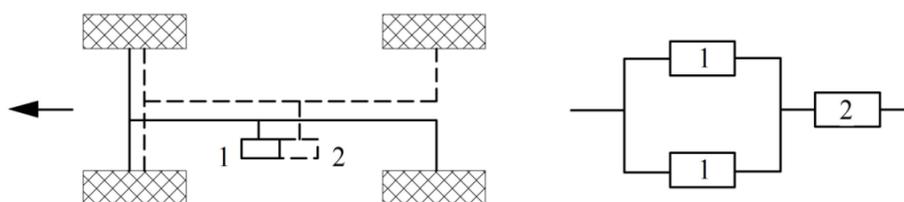


Рис. 7.9. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура и одного из цилиндров задних колес: 1 – контур, объединяющий первую секцию главного тормозного цилиндра, тормозные механизмы передних и заднего левого колес; 2 – контур, объединяющий вторую секцию главного тормозного цилиндра, тормозные механизмы передних и заднего правого колес

Вероятность безотказной работы тормозной системы с таким видом резервирования составляет

$$P(t) = 1 - (1 - P_1) (1 - P_1 P_2) = 0,981.$$

На рис. 7.10 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.

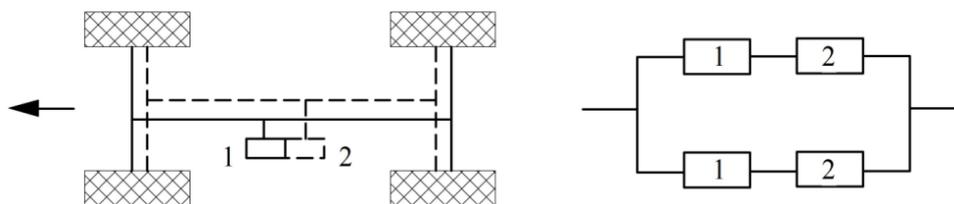


Рис. 7.10. Схема тормозной системы с общим резервированием: 1 – контур, объединяющий первую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы всех колес; 2 – контур, объединяющий вторую секцию главного тормозного цилиндра и тормозные механизмы всех колес

7.2. Обеспечение надежности машин при их производстве

В процессе изготовления машин 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 отказы, 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 прежде всего определяется технологической надежностью применяемого оборудования и обеспечением точности его 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 изготавливаемых машин. Поэтому необходимое условие обеспечения технологической надежности оборудования – сохранение их высоких начальных характеристик в течение заданного периода работы.

Точность изготовления деталей, которая определяется точностью геометрических размеров рабочих поверхностей и их взаимного расположения, прежде всего зависит 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.

Существенное 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. 7.11).

Кроме износостойкости точность и качество изготовления деталей оказывают существенное влияние на выносливость деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, коррозионную стойкость, сопротивляемость динамическим нагрузкам.

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.

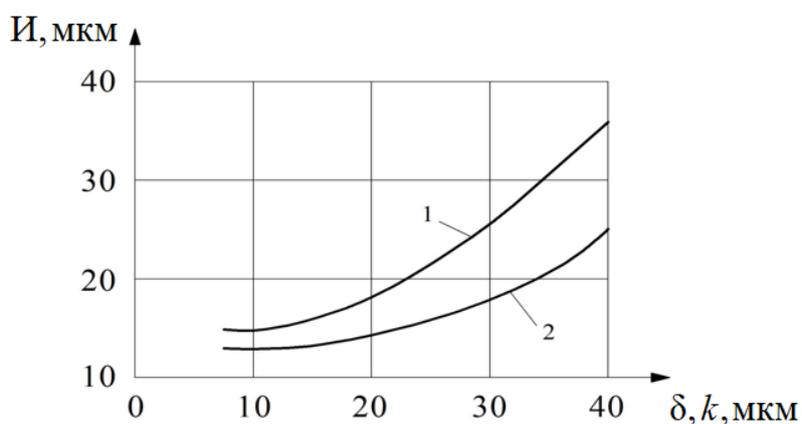


Рис. 7.11. Зависимости износа I от овальности δ (1) и конусности k (2) гильз цилиндров

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 её 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 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, можно назвать:

- чистовую обработку 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 её изготовления – один из основных методов обеспечения надежности машин. Под контролем понимается проверка соответствия продукции или процесса, от которого зависит её 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 перспективным является обработка рабочих поверхностей *пластическим деформированием*. Пластическое деформирование с успехом применяется 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 с образованием новой поверхности со значительно лучшими эксплуатационными свойствами.

Пластическое деформирование металла сопровождается наклепом, которому подвергаются лишь тонкие поверхностные слои. 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, повышается 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.

Глубина наклепа при пластическом деформировании определяется назначением обработки. Она исчисляется десятыми долями миллиметра при чистовой обработке с упрочнением, в то время как при упрочнении рабочей поверхности достигает нескольких миллиметров.

Упрочнение металлических деталей пластическим деформированием находит все более широкое применение при изготовлении конструктивных элементов машин, в том числе на поточных и автоматических линиях. В автомобилестроении используются такие процессы поверхностного пластического деформирования, как раскатывание и обкатывание многороликовыми инструментами, алмазное выглаживание наружных и внутренних поверхностей, вибрационное обкатывание, профильное накатывание и др. Такие детали, как пружины, рессоры, шестерни, шатуны и другие подвергаются дробеструйной обработке (дробенаклепу). Коленчатые валы, оси, полуоси и поворотные цапфы весьма эффективно упрочняются обкаткой роликами и шариками. Рабочие поверхности втулок, верхних головок шатунов, гильз цилиндров, отверстий в корпусах коробок передач и задних мостов обрабатывают 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 изменений геометрических размеров и формы детали не происходит. Основная цель термической обработки – целенаправленное изменение 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 отпуском и поверхностная закалка стальных и чугунных деталей. В основе методов термического упрочнения – 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 закалки и последующего

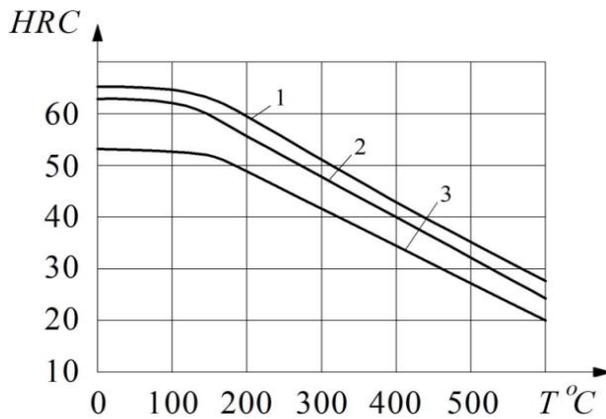


Рис. 7.12. Зависимость твердости материала стальных деталей с различным содержанием углерода C от температуры отпуска: 1 – $C = 0,8 \%$; 2 – $C = 0,6 \%$; 3 – $C = 0,35 \%$

после закалки. Объемная закалка не всегда обеспечивает требуемые свойства деталей. Наиболее нагруженный при эксплуатации 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 закалки нагреву при таком виде упрочнения подвергается только рабочая поверхность детали. Нагрев поверхностного слоя при термической обработке 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 и такие методы, как 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 и нитроцементации включают в себя выполнение следующих этапов: нагрев, химическое воздействие (насыщение), объемная закалка и низкотемпературный отпуск. *Цементации и нитроцементации* подвергают самые разнообразные детали автомобилей, но наибольшее применение данные методы находят при упрочнении зубчатых колес, к которым предъявляются повышенные требования к прочности, износостойкости, усталостной и контактной выносливости.

Азотированию подвергают 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: плазменный, детонационный и вакуумное ионно-плазменное напыление 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. Износостойкость обработанных этим способом деталей повышается в несколько раз.

Нанесение покрытий *детонационным способом* предусматривает сочетание температурного (газоплазменного) и импульсного (взрывного) 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 таблице приведены перспективные методы упрочнения деталей автомобилей.

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 нагрузкам

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 автомобилестроении.
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 заключается сущность упрочнения деталей нанесением специальных покрытий?
16. Какие способы нанесения покрытий используют для упрочнения рабочих поверхностей деталей?

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Эксплуатация технических систем – более длительный, трудоемкий и дорогой процесс, чем их производство. Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт автомобиля, например, за весь период эксплуатации по разным оценкам в 5 – 10 раз превышают его первоначальную стоимость. Поэтому поддержание работоспособного состояния технических систем в эксплуатации – важнейшая составная часть общей системы обеспечения их надежности, предыдущими этапами которой являются проектирование и производство.

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. (рис. 8.1).



Рис. 8.1. Факторы, влияющие на надежность автомобилей в эксплуатации

Приведенные факторы (см. рис. 8.1) с некоторой условностью можно разделить на три группы: неуправляемые, частично управляемые и управляемые.

Неуправляемыми, но оказывающими большое влияние на надежность автомобилей в эксплуатации, являются факторы *внешней среды* (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 *пятой* категории условий эксплуатации, например, в соответствии с отраслевыми нормативами технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта периодичность ТО и нормативный ресурс автотранспортных средств снижаются на 40 %, удельная трудоемкость текущего ремонта увеличивается в 1,6 раза по сравнению с *первой* категорией. При работе автомобилей в таких тяжелых условиях резко возрастают поток отказов и затраты на их устранение.

Существенное влияние на безотказность и долговечность автомобилей оказывают *природно-климатические условия*. В районах холодного и очень холодного климата на 20 – 30 % снижаются периодичность ТО и ресурсный пробег автомобилей, а удельная трудоемкость ремонтных работ возрастает в 1,2 – 1,3 раза.

Изменение категории условий эксплуатации, климатического района оказывают 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 разд. 4.7.

Большое влияние на интенсивность изнашивания и надежность конструктивных элементов автомобиля и прежде всего двигателя оказывает качество используемых эксплуатационных материалов – топлива, масла, охлаждающей жидкости.

В качестве основных видов топлива для автомобилей применяются *бензин* и *дизельное топливо*. Используемые в современных автомобилях топлива влияют не только на динамику процесса сгорания, но и 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, с учетом особенностей рабочего процесса дизельных двигателей.

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 повреждения, 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.

В процессе эксплуатации под воздействием внешней среды эксплуатационные свойства моторных масел ухудшаются. Ухудшение качества масла происходит вследствие его загрязнения продуктами изнашивания деталей, попадания в него 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 масла в нем 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 происходит главным образом вследствие угара в камере сгорания и из-за появления утечек через сальники и другие уплотнения. Недостаточное количество масла в системе смазки двигателя – одна 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 задиры, распространяющиеся до зоны колец (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/кВт·ч.

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. 8.1).



Рис. 8.2. Задиры на юбке поршня из алюминиевого сплава при работе с недостаточным количеством масла

Таблица 8.1. 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 от 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 от нормативного значения	–	131	76	58,0
Годовые затраты на ТО и ремонт, %	100	75	115	153,3

Как видно из приведенной таблицы, повышение квалификации водителей существенно улучшает показатели, характеризующие эксплуатационную 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 наиболее значимое 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, включающая 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 про-

изводственными и складскими помещениями, рабочими постами и точными 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

Основная задача технической эксплуатации – поддержание работоспособного состояния машин на уровне, требуемом 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 основная цель системы – 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.

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 обслуживания и

ремонта понимается система правил управления техническим состоянием изделия в процессе ТО и 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 ими 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 од-

нотипных изделий изменение параметра Y , определяющего их техническое состояние, носит случайный характер и характеризуется дифференциальной функцией распределения $f(t)$.

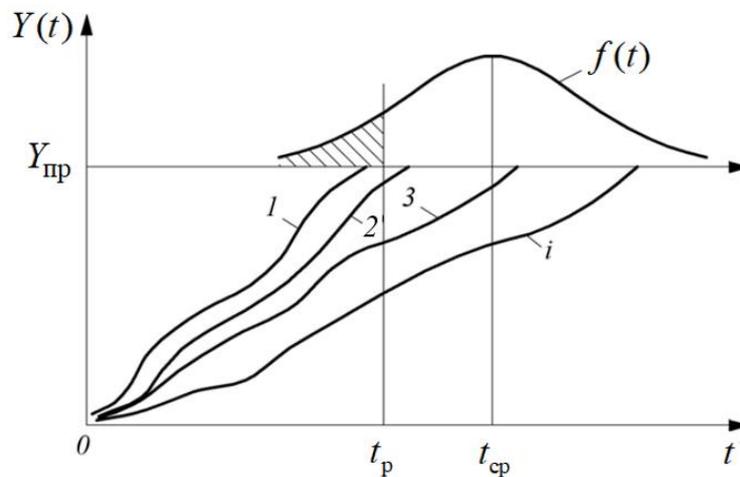


Рис. 8.3. Схема формирования отказа изделия

Отказ изделия происходит в момент пересечения реализацией $Y_i(t)$ уровня, соответствующего предельному значению параметра $Y_{пр}$. Под влиянием неблагоприятных условий внешней среды отказ какой-то части изделий может произойти до проведения плановых технических воздействий (реализация 1). Остаточный ресурс большей части изделий (реализации 2, ..., i) 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 исключить в полном объеме перечисленные недостатки, то значительно снизить их количество. Такая 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.). Регулирующие, 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 простои машин по техническим причинам за счет достоверной постановки диагноза об их фактическом состоянии.

Таким образом, стратегия технического обслуживания и ремонта по состоянию более рациональная и эффективная 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 предупредительного 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 – профилактическое мероприятие, проводимое 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 невысокая трудоемкость, а также то, что они выполняются в основном без разборки агрегатов, уз-

лов 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 числа 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, основная задача технического обслуживания – 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.

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, когда отказ уже возник, не имеет никакого смысла, так как для восстановления работоспособного состояния изделия необходим ремонт.

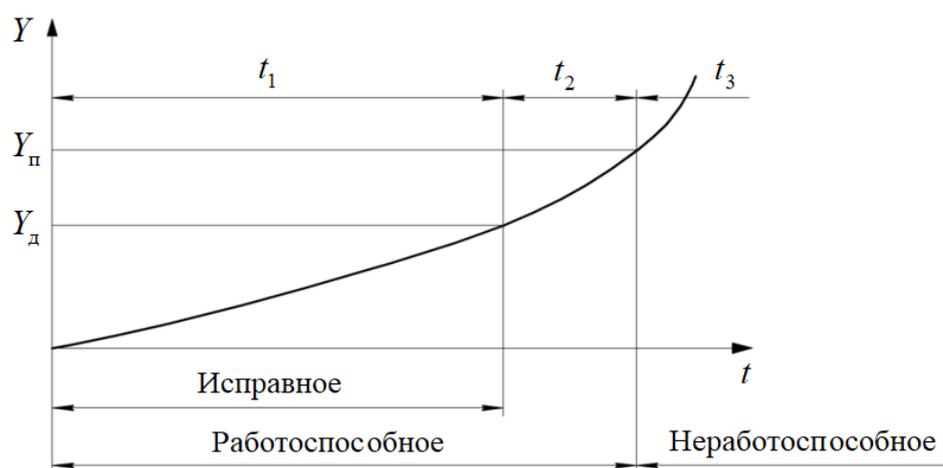


Рис. 8.4. Схема развития постепенного отказа:

t_1 – наработка до возникновения неисправности; t_2 – наработка, в течение которой неисправность перерастает в отказ; t_3 – наработка, соответствующая переходу изделия в предельное состояние

Периодичность ТО на автотранспортных предприятиях в зависимости от конкретных условий может определяться:

- по допустимому уровню безотказности;
- закономерности изменения параметра технического состояния и его допустимому значению;
- минимуму суммарных удельных затрат на ТО и ремонт (технико-экономический метод);
- диагностической информации о техническом состоянии объекта.

Периодичность ТО по *допустимому уровню безотказности* определяется из условия, что вероятность безотказной работы изделия не может быть ниже заданной величины R_d , называемой риском:

$$P_d(t_i \geq t_0) \geq R_d = \gamma, \quad (8.1)$$

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, то есть $t_0 = t_\gamma$ (рис. 8.5). Такая периодичность обеспечивает высокий уровень безотказной работы автомобиля на наработке между очередными профилактическими обслуживаниями.

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.

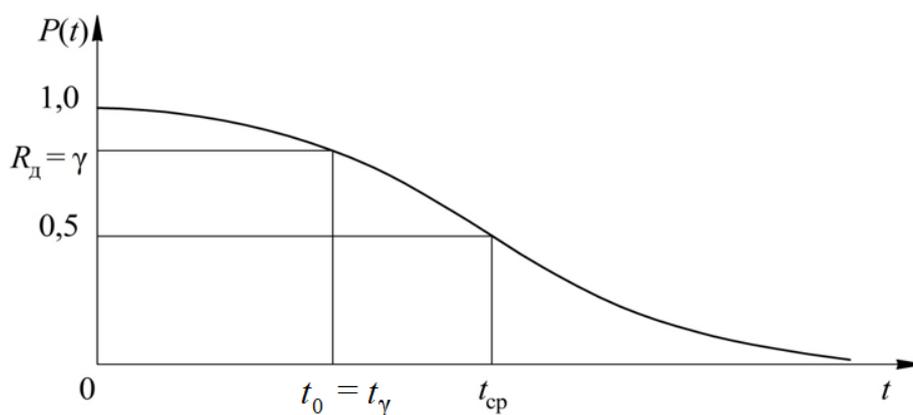


Рис. 8.5. Определение периодичности ТО по допустимому уровню безотказности

Метод определения периодичности ТО по закономерности изменения параметра технического состояния и его допустимому значению является статистически-аналитическим.

Изменение любого параметра технического состояния у группы автомобилей в зависимости от множества факторов, оказывающих влияние на интенсивность α этого процесса, происходит в широких пределах (рис. 8.6, кривые 1 – 7).

По статистическим реализациям параметра Y можно определить среднее значение наработки изделий $t_{\text{ср}}$ до достижения ими допустимого значения $Y_{\text{д}}$. На схеме этому значению наработки соответствует реализация 4 и средняя интенсивность изменения параметра $\alpha_{\text{ср}}$.

Если принять периодичность ТО равной средней наработке, то часть автомобилей, интенсивность изменения параметра Y которых выше $\alpha_{\text{ср}}$, с высокой степенью вероятности откажут на наработках, существенно ниже $t_{\text{ср}}$ (реализации 1, 2, 3). Для автомобиля 1, например, вероятность отказа составит $F = F_4 = 0,5$.

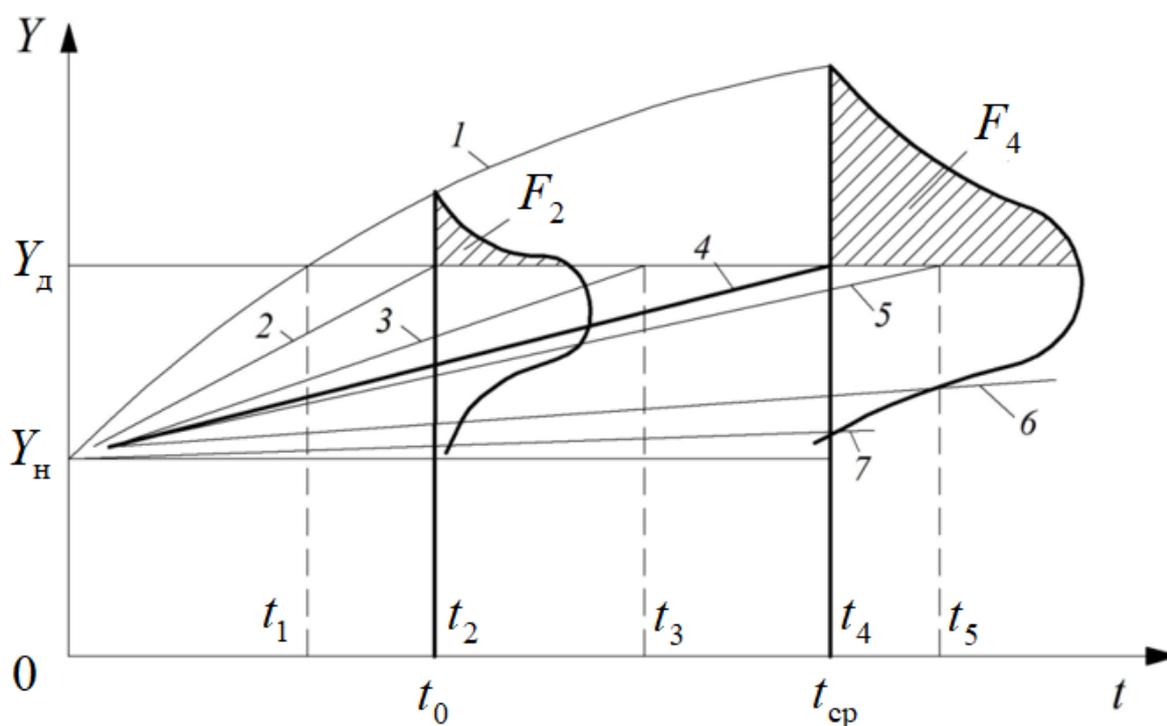


Рис. 8.6. Схема определения периодичности ТО по допустимому значению и закономерности изменения параметра технического состояния

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

$$\alpha_d = \mu \alpha_{\text{ср}}, \quad (8.2)$$

где μ – коэффициент максимальной интенсивности изменения параметра технического состояния.

В этом случае должно соблюдаться условие

$$1 - P_d(\alpha_i \leq \alpha_d) = 1 - F = R_d, \quad (8.3)$$

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).

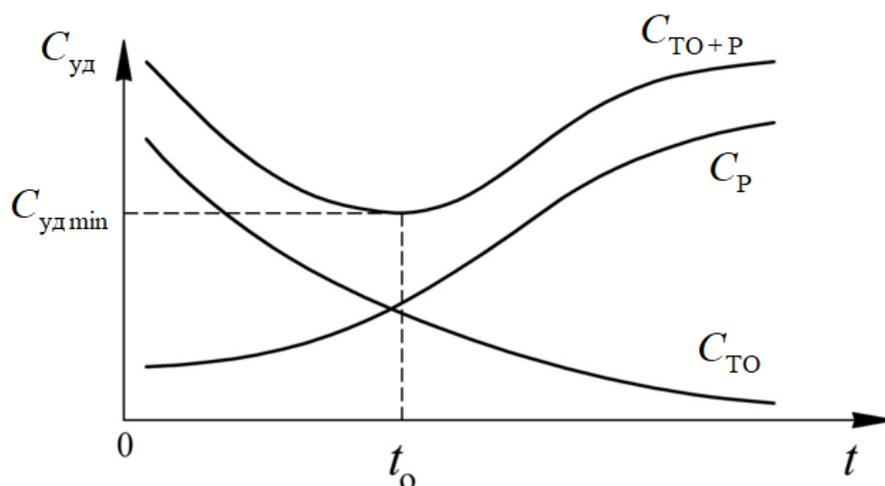


Рис. 8.7. Зависимость затрат на ТО и ремонт от периодичности ТО

В аналитической форме метод можно представить в виде целевой функции, экстремальное значение которой соответствует оптимальному решению

$$C_{уд} = C_{то} / t_о + C_p / t_p \Rightarrow \min, \quad (8.4)$$

где $C_{то}$ — затраты на операции ТО; C_p — затраты на ремонтные воздействия; $t_о$ — 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 метода 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 в работоспособном состоянии. 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.

8.2.3. 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 техническому состоянию.

Ремонт по наработке выполняют 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. Утраченную работоспособность при ТР восстанавливают 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. Необходимость в его проведении определяется по заявкам водителей при возвращении автомобиля с линии, проведении контрольно-диагностических работ ЕО, 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 выполняют такие работы, как оценку технического состояния всех агрегатов и механизмов, замену двигателя, достигшего предельного состояния, ремонт неисправных агрегатов с заменой или ремонтом деталей, другие работы по восстановлению исправного состояния автомобилей. Такой вид ремонта проводят, 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 направляют 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 восстановление агрегатов 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, 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 их 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 на гарантийном пробеге.

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.

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 крепежных 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 разборки. Из этого определения следует, что техническая диагностика – важный элемент 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 главная ее цель – 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 – важный элемент системы ТО и ремонта, обеспечивающий 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 качественно более совершенная форма 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, тормозных качеств 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 (остаточном ресурсе), 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 автомобилей:
 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**.

Системы диагностирования делятся 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. Алгоритм 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 в себя 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 самые различные методы и средства диагностирования.

Различают 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, оценивается визуальным осмотром 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 сравнением 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).



Рис. 8.9. Классификация методов диагностирования автомобилей

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. Оценку 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 известны следующие методы:

- *по герметичности* рабочих объемов агрегатов и узлов (цилиндропоршневая группа двигателя, пневматический привод тормозных систем, плотность прилегания клапанов, давление в шинах и др.);
- *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;
- *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 измерения текущих значений диагностических параметров. Они включают в себя 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:

- на 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 в себя 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 устанавливают на планируемый для диагностирования автомобиль перед его выходом на линию и снимают 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 сопровождаются 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).

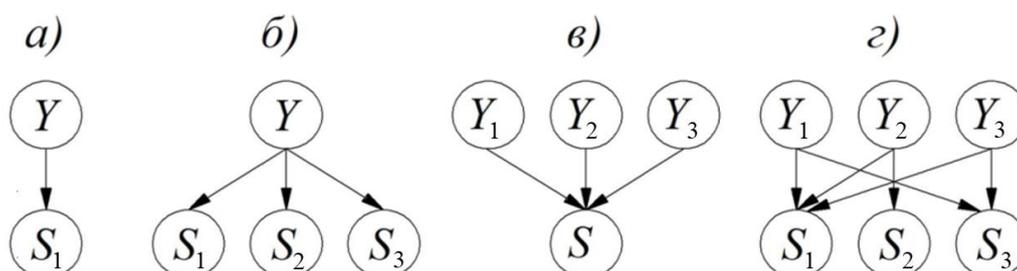


Рис. 8.10. Взаимосвязи диагностических и структурных параметров

Эти связи могут быть единичными (рис. 8.10, а), если с изменением конкретного структурного параметра изменяется один диагностический; множественными (рис. 8.10, б), если изменение одного структурного параметра ведет к изменению нескольких диагностических; неопределенными (рис. 8.10, в), когда один диагностический параметр может изменяться при изменении нескольких структурных; комбинированными (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 выбирают 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.

Стабильность диагностического параметра определяется отклонениями его величины от среднего значения при неизменном значении структурного параметра Y_i (рис. 8.12).

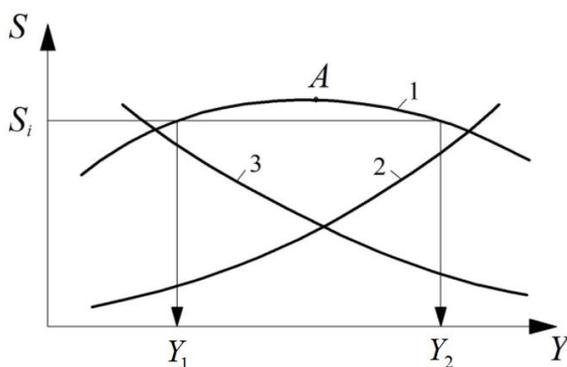


Рис. 8.11. Закономерности изменения диагностических параметров: 1 — не обладающий однозначной зависимостью (имеется экстремум в точке A); 2 и 3 — обладающие однозначной зависимостью

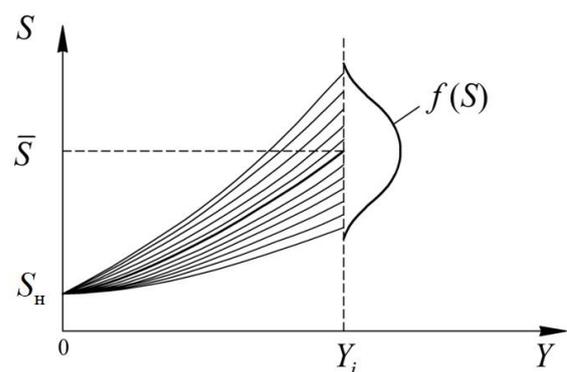


Рис. 8.12. Рассеивание результатов измерения диагностического параметра

Это свойство диагностического параметра характеризует достоверность диагноза и может быть оценено величиной среднего квадратического отклонения, характеризующего меру рассеивания диагностического параметра S_i относительно центра группирования \bar{S}

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n-1}}, \quad (8.5)$$

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 структурного 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. $\varphi_1 > \varphi_2$.

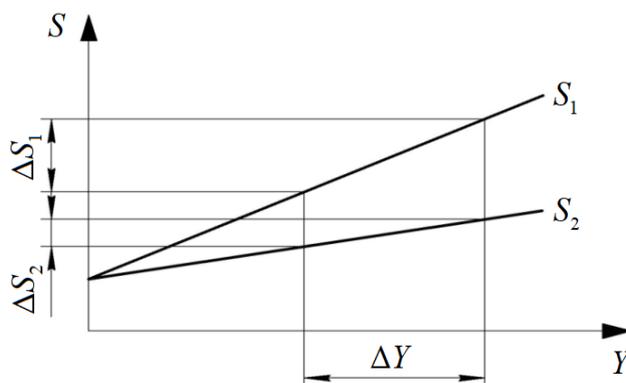


Рис. 8.13. Схема определения чувствительности диагностических параметров

По результатам испытаний чувствительность диагностического параметра оценивается коэффициентом чувствительности

$$K_{\text{ч}} = \left| \frac{dS}{dY} \right|. \quad (8.6)$$

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

$$I = H_{\text{н}} - H_i, \quad (8.7)$$

где $H_{\text{н}}$, H_i – неопределенность (энтропия) состояния объекта до и после измерения i -го диагностического параметра.

При диагностировании автомобиля как сложной технической 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).

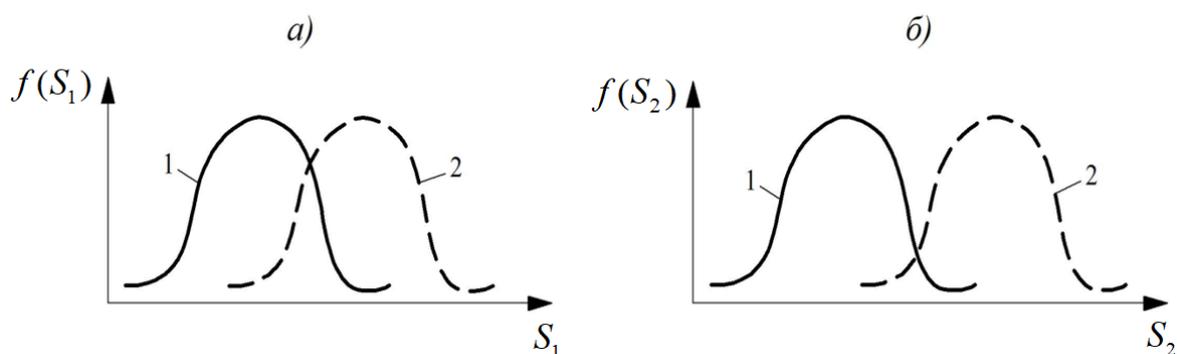


Рис. 8.14. Распределение значений малоинформативного S_1 и высокоинформативного S_2 диагностических параметров:
1, 2 – исправное и неисправное состояния объектов

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;
- разработку структурно-следственной модели диагностируемого объекта;

- разработку 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 позволяет определить предварительный комплекс диагностических параметров для оценки его технического состояния. Окончательно диагностические параметры выбирают 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 переднеприводного автомобиля семейства ВАЗ.

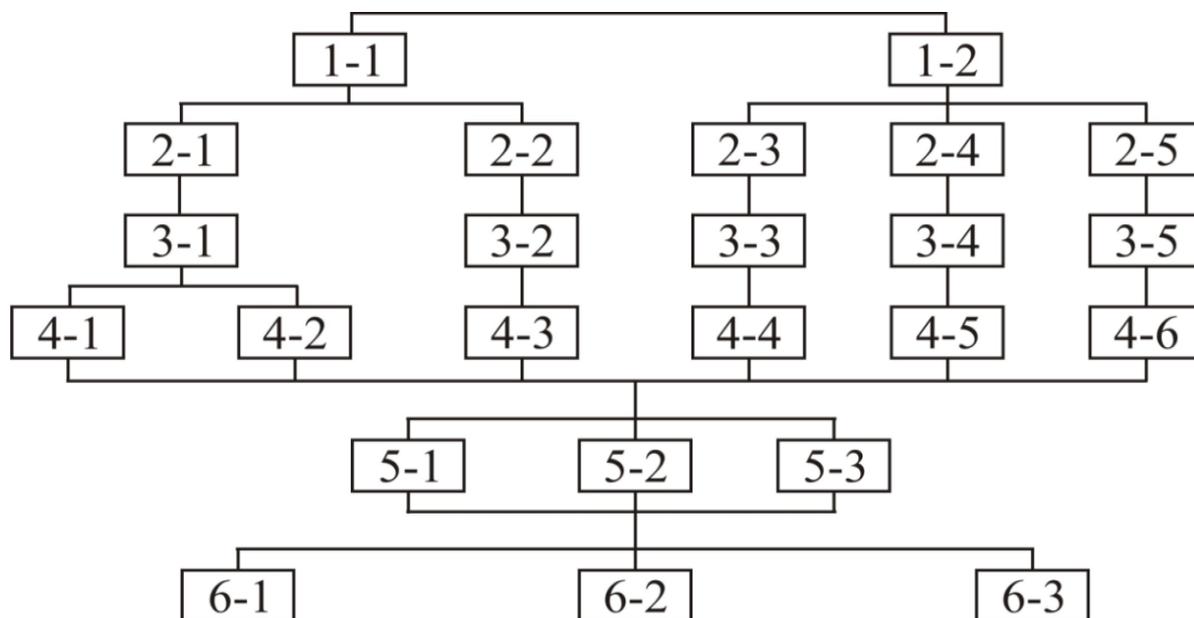


Рис. 8.15. Блок-схема структурно-следственных связей рулевого управления: 1-1 – рулевой механизм; 1-2 – рулевой привод; 2-1 – сопряжение рейка – приводная шестерня рулевого механизма; 2-2 – эластичная муфта рулевого вала; 2-3 – рулевые тяги; 2-4 – шаровые шарниры рулевых тяг; 2-5 – резинометаллические 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 колёс; 6-3 – увод автомобиля от заданной траектории движения

Из схемы видно, что параметры шестого уровня (суммарный люфт в рулевом управлении, углы установки управляемых колёс, увод автомобиля от заданной траектории движения) с достаточной степенью точности оценивают эксплуатационные свойства рулевого управления, что позволяет использовать их в качестве диагностических.

8.3.4. Нормирование диагностических параметров

Важнейший этап разработки системы диагностирования – 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 (или начальное), предельное и допустимое S_d значения диагностического параметра.

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 соответствует состоянию объекта, при котором обеспечивается заданный уровень безотказной работы наработки до проведения очередного контроля.

Диагностические нормативы можно подразделить на три основные группы:

- нормативы, устанавливаемые государственными стандартами;
- нормативы, определяемые конструктивными и технологическими факторами при изготовлении объекта;
- нормативы, 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, вибраций 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 инструкциями 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 определяют дифференцированно для конкретных условий эксплуатации с помощью статистических методов, учитывающих 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 не следует исключать, 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. Для ответственных узлов и механизмов (например, непосредственно влияющих на безопасность движения) целесообразно использовать более жесткое ограничение распределения диагностического параметра уровнем вероятности $P = 0,85$, для остальных – менее жесткое $P = 0,95$. Полученные таким образом граничные значения полученного распределения считают предельными нормативами диагностического параметра $S_{п}$.

Ограничение области распределения диагностического параметра в зависимости от физической сущности контролируемого объекта может быть верхним, нижним или двухсторонним, когда параметр ограничивается и верхним, и нижним уровнями доверительной вероятности (рис. 8.16).

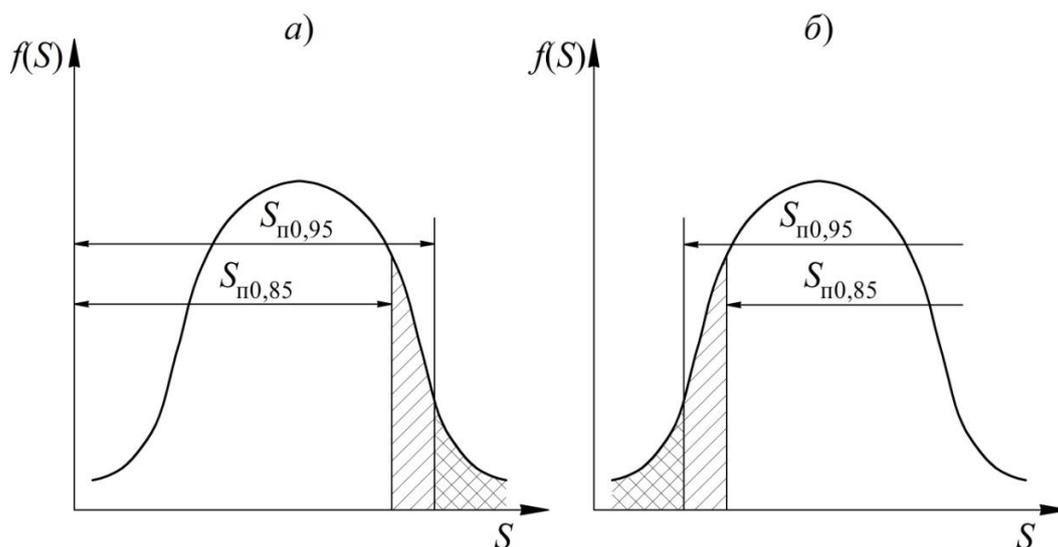


Рис. 8.16. Схема определения предельных нормативов диагностических параметров

На практике с относительно небольшой погрешностью при определении предельных значений диагностических параметров может быть использован метод прибавления к найденному среднеарифметическому значению параметра \bar{S} одно- или полутора кратного значения среднеквадратического отклонения σ .

При одностороннем верхнем ограничении (рис. 8.16, а):

$$S_{п0,85} = \bar{S} + \sigma, \quad S_{п0,95} = \bar{S} + 1,5\sigma. \quad (8.8)$$

При одностороннем нижнем ограничении (рис. 8.16, б):

$$S_{п0,85} = \bar{S} - \sigma, \quad S_{п0,95} = \bar{S} - 1,5\sigma. \quad (8.9)$$

Практическая реализация процедуры определения предельных значений диагностических параметров, учитывающих условия эксплуатации, включает в себя 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 ν 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.

В системе управления техническим состоянием автомобилей в качестве нормативов целесообразно использовать не предельное $S_{\text{п}}$, а допустимое $S_{\text{д}}$ значение диагностического параметра, которое определяется при наличии зависимости его изменения по наработке. Для постепенных отказов изменение диагностического параметра по наработке аналитически с достаточной степенью точности описывается двумя функциями:

- линейная функция $S = S_{\text{н}} + \nu t$; (8.10)

- степенная функция $S = S_{\text{н}} + \nu t^{\alpha}$, (8.11)

где $S_{\text{н}}$ – начальное значение диагностического параметра; ν – интенсивность изменения диагностического параметра по наработке; t – наработка изделия; α – показатель степени, определяющий характер и степень зависимости параметра S от наработки t (при $\alpha = 1$ степенная функция преобразуется в линейную).

Зная межконтрольную наработку (периодичность диагностирования $t_{\text{д}}$), величину предельного норматива $S_{\text{п}}$ и интенсивность изменения параметра по наработке ν , значение допустимого норматива определяется из выражения

$$S_{\text{д}} = \nu \left(\alpha \sqrt[\alpha]{\frac{S_{\text{п}}}{\nu} - t_{\text{д}}} \right). \quad (8.12)$$

Полученные значения предельных и допустимых нормативов диагностических параметров являются основными элементами в системе управления техническим состоянием узлов, механизмов и систем автомобилей. Отклонения значений параметров за пределы допуска, вызываемые возникновением неисправностей, служат основой для принятия

решения о проведении необходимых технических воздействий (операций углубленного диагностирования, регулировок, ремонта и т.д.).

Пример. Определить предельное значение «увода» автобуса ЛиАЗ-5256 от заданной траектории движения. Испытания проводились на диагностическом стенде с измерительной подвижной плитой и автоматической фиксацией «увода» в метрах на километр пробега. Результаты измерений представительной выборки обследования ($N = 60$ ед.) представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2. Результаты измерений «увода» автобусов

Интервал	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
Границы интервалов, м	0 – 2	2 – 4	4 – 6	6 – 8	8 – 10	10 – 12	12 – 14
Середины интервалов, м	1	3	5	7	9	11	13
Опытные частоты m_i	2	11	20	21	3	2	1

По результатам измерений строим гистограмму распределения диагностического параметра Y , аппроксимирующую ее теоретическую кривую (рис. 8.17), и определяем числовые характеристики распределения:

- среднее арифметическое результатов измерений

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i m_i = 5,73 \text{ м};$$

- среднее квадратичное отклонение

$$\sigma(Y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 m_i} = 2,30 \text{ м};$$

- коэффициент вариации

$$v = \frac{\sigma(Y)}{\bar{Y}} = 0,40.$$

Используя выражение (8.8), определяем значение предельного норматива «увода» автобуса $Y_{\text{п}}$ от заданной траектории движения, ограниченного уровнем вероятности $P = 0,85$.

$$Y_{\text{п}} = \bar{Y} + \sigma = 5,73 + 2,30 \approx 8 \text{ м/км}.$$

Это же значение «увода» подтверждается рис. 8.17. При достижении такого значения «увода» водитель начинает ощущать значительные затруднения в управлении автобусом, нарушается его устойчивость, увеличиваются износ шин, расход топлива и др.

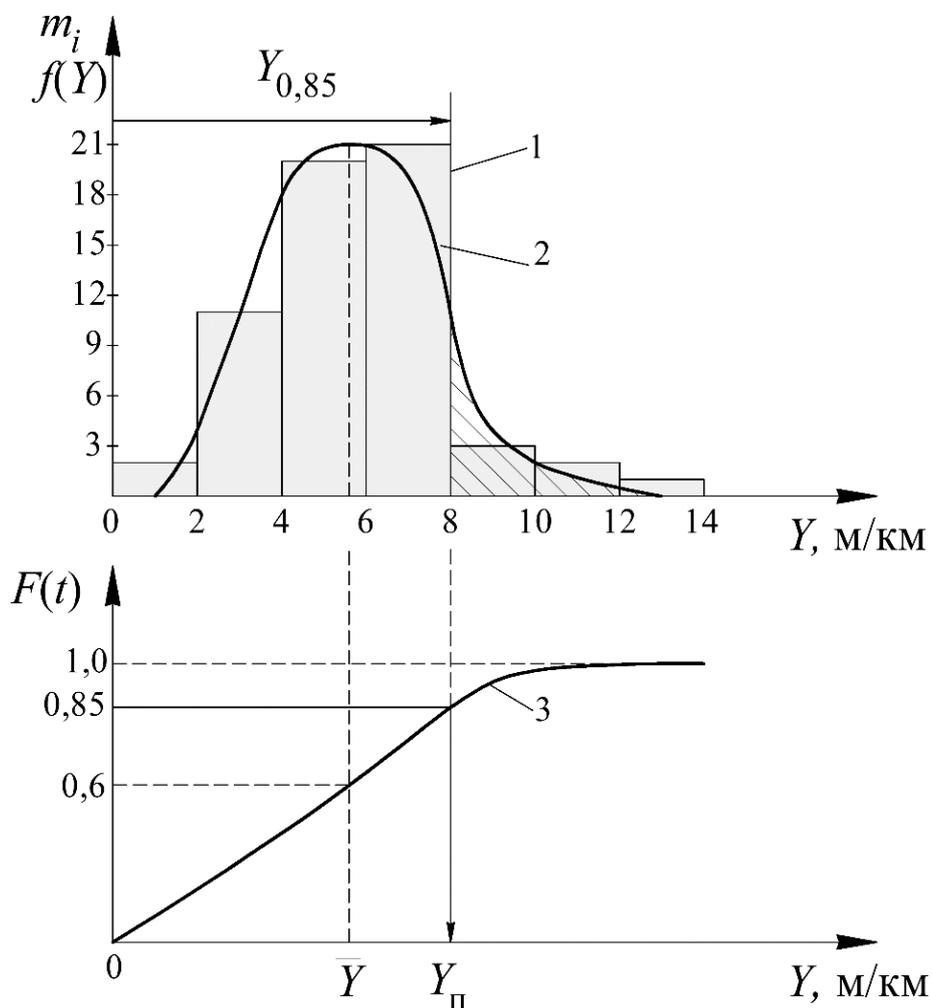


Рис. 8.17. Распределение значений «увода» автобусов:
1 – гистограмма; 2, 3 – дифференциальная и интегральная функции распределения

Теоретическая кривая зависимости изменения параметра Y по наработке t , найденная по результатам обработки опытных данных с помощью программы Microsoft Excel, имеет следующий вид:

$$Y = Y_n + \nu t^\alpha = 0,7 + 0,0002t^{1,0},$$

где t – наработка автобуса, км; $Y_n = 0,7$ м/км – номинальное (начальное) значение «увода»; $\nu = 0,00018$ м/км – интенсивность изменения параметра Y по наработке; $\alpha = 1,0$ – показатель степени.

При известной межконтрольной наработке (периодичности диагностирования $t_d = 10\ 000$ км), величине предельного норматива $Y_n = 8,0$ м и интенсивности изменения «увода» автобуса по наработке $v = 0,00018$ м/км значение допустимого норматива определяется из выражения (8.12):

$$Y_d = 0,00018 \left(1,0 \sqrt{\frac{8}{0,00018}} - 10000 \right) = 6,2 \text{ м.}$$

8.3.5. Прогнозирование остаточного ресурса

Одна из основных задач диагностирования – прогнозирование остаточного ресурса объекта, под которым понимается определение продолжительности его исправной работы до наступления предельного состояния.

На начальной стадии создания автомобиля (проектирование и конструирование) оценку его ресурса осуществляют в основном по результатам конструкторских расчетов и статистических данных о его аналогах. Прогнозируемый при этом ресурс – заданная величина, соответствующая некоторой вероятности, с которой ресурс должен быть реализован в эксплуатации. Поэтому на стадии проектирования в качестве прогнозируемого ресурса в технической документации указывается некоторый средний ресурс t_{cp} – математическое ожидание наработки изделия до предельного состояния.

В реальных условиях эксплуатации ресурс объекта из-за воздействия на него множества случайных факторов варьирует в довольно широких пределах. Например, ресурс двигателей ЗМЗ-4063.10 по результатам эксплуатационных наблюдений варьирует от 160 до 250 тыс. км (рис. 8.18). Поэтому ресурс объекта следует считать случайной величиной, и он может быть описан только вероятностными моделями. В качестве такой модели обычно используется дифференциальная функция (плотность) распределения наработок объекта до предельного состояния. В этом случае теоретическое значение среднего ресурса автомобиля от начала его эксплуатации до списания определяется по формуле

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt, \quad (8.13)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до предельного состояния.

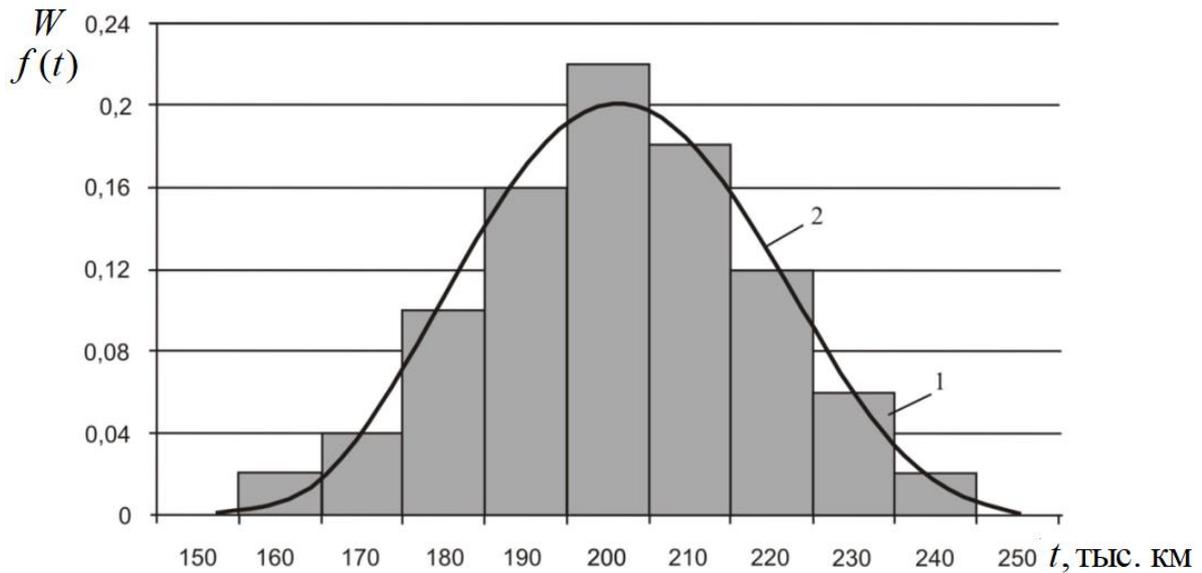


Рис. 8.18. Гистограмма 1 и теоретическая кривая распределения 2 ресурса двигателей

В отличие от стадии проектирования, когда прогнозируется ресурс всей генеральной совокупности создаваемых объектов, прогнозирование на стадии эксплуатации выполняют для конкретных изделий, частично реализовавших свой ресурс. В этом случае оценивается индивидуальный остаточный ресурс объекта, т.е. возможная продолжительность его эксплуатации от момента контроля технического состояния до достижения им предельного состояния, который отличается от ресурса тем, что в качестве начала отсчета принимается текущая наработка, до которой объект уже какое-то время эксплуатировался.

Достижение объектом предельного состояния, соответствующего исчерпанию его ресурса, сводится не только к физическому износу. Оно может быть обусловлено также влиянием факторов функционального устаревания, недопустимости дальнейшей эксплуатации по требованиям безопасности, экономичности и эффективности. Поэтому определение точных признаков и параметров, при которых состояние объекта следует квалифицировать как предельное, представляет довольно сложную задачу. Обычно основанием для списания машин служит резкое увеличение интенсивности отказов, продолжительности простоев из-за необходимости их устранения, расходов на проведение ремонтных работ.

Для надежного прогнозирования остаточного ресурса объекта необходимо выполнить его полнокомплектное техническое диагностирование с использованием соответствующих средств контроля. Это требует больших затрат, из-за чего в практике технической эксплуатации, за исключением случаев, когда оцениваются единичные и дорогостоящие машины, не находит применения. В условиях реальной эксплуатации при проведении технических обслуживаний и ремонтов машин чаще всего оценивается остаточный ресурс их узлов, агрегатов и механизмов.

Современные методы прогнозирования технического состояния объектов подразделяются на три основные группы: методы экспертных оценок, методы моделирования, статистические методы.

Наиболее достоверные при прогнозировании индивидуального остаточного ресурса машин в условиях эксплуатации – статистические методы, основанные на объективной оценке технического состояния в текущий момент времени. Процесс прогнозирования с использованием статистических методов предусматривает выполнение следующих этапов:

- сбор и обработка статистической информации по эксплуатационной надежности объектов;
- обоснование комплекса диагностических параметров, адекватно отражающих техническое состояние;
- построение графиков изменения диагностических параметров по статистическим данным;
- разработка аналитических уравнений, описывающих закономерности изменения этих параметров по наработке;
- статистическая оценка остаточного ресурса.

При прогнозировании непосредственно измерить остаточный ресурс объекта практически невозможно. Поэтому необходимо определить аналоговый диагностический параметр или комплекс таких параметров, которые адекватно отражают техническое состояние объекта и реализацию его ресурса по наработке. Для агрегатов автомобиля это могут быть параметры эффективности функционирования (мощность, крутящий момент, расход топлива и др.), геометрические параметры (люфты, зазоры) и параметры сопутствующих процессов (герметичность рабочих объемов, вибрации, физико-химический состав обработавших эксплуатационных материалов и т.д.).

Изменение аналогового диагностического параметра по наработке для большинства узлов и агрегатов автомобиля, как уже отмечалось выше, описывается линейной или степенной функциями. При прогнозировании их ресурса в качестве аналитического уравнения чаще всего используется степенная функция, выраженная формулой (8.11). Графическая интерпретация этой зависимости представлена на рис. 8.19.

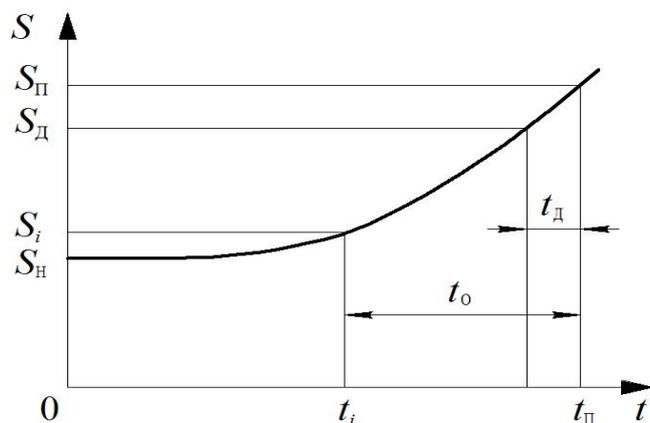


Рис. 8.19. Схема определения остаточного ресурса по реализации диагностического параметра: $S_i, S_н, S_п$ – текущее, номинальное и предельное значения диагностического параметра; $t_i, t_о, t_п$ – текущий, остаточный и полный ресурсы

Из приведенной схемы видно, что остаточный ресурс объекта $t_о$ представляет собой разность между полным ресурсом $t_п$, который соответствует предельному значению диагностического параметра $S_п$, и продолжительностью его эксплуатации, предшествующей прогнозируемому периоду t_i . Полный ресурс объекта $t_п$ при степенной зависимости диагностического параметра по наработке определяют из выражения

$$t_п = \alpha \sqrt[\alpha]{\frac{|S_п - S_н|}{\nu}}. \quad (8.14)$$

Остаточный ресурс $t_о$ после некоторой наработки t_i , предшествующей прогнозируемому периоду, определяют по формуле

$$t_о = t \left[\left(\frac{S_п - S_н}{S_i - S_н} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right], \quad (8.15)$$

где α – показатель степени, характеризующий изменение диагностического параметра S по наработке t .

Значения показателя α определяются опытным путем для различных сопряжений механизмов на основе обработки статистического материала и представляют собой некоторые усредненные величины.

Пример. Определить остаточный ресурс цилиндропоршневой группы двигателя ЗМЗ-4063.10. Для оценки технического состояния

двигателя были выбраны следующие диагностические параметры: давление в конце такта сжатия; значение относительных утечек воздуха при положении поршня в ВМТ; расход картерных газов при 4000 мин⁻¹; значение давления в главной масляной магистрали. Использование других диагностических параметров приводит к значительному усложнению процедуры диагностирования.

В табл. 8.3 приведены установленные техническими условиями завода-изготовителя нормативные значения этих параметров, а также значения показателя α , найденные по результатам экспериментальных исследований технического состояния цилиндропоршневой группы двигателей.

Таблица 8.4. Нормативные значения параметров диагностирования технического состояния ЦПГ и показателя α для этих параметров

№ п/п	Диагностический параметр	Номинальное значение	Предельное значение	Показатель α
1	Давление в конце такта сжатия, кгс/см ²	12	9,6	1,3
2	Относительная утечка воздуха при положении поршня в ВМТ, кг/см ² , в течение не менее 5 с	Снижение с 1,5 до 1,0	Снижение с 1,5 до 0,75	1,6
3	Расход картерных газов при 4000 мин ⁻¹ , л/мин, не более	22	62	1,5
4	Давление в главной масляной магистрали при 2500 мин ⁻¹ , кгс/см ²	5,0	3,0	1,4

Остаточный ресурс цилиндропоршневой группы двигателя рассчитываем по каждому диагностическому параметру на пробеге 165 тыс. км и в качестве искомого принимаем его минимальное значение. По результатам выполненных контрольно-диагностических операций были получены следующие значения диагностических параметров после этой наработки:

- давление в конце такта сжатия, кгс/см² – 10,8
- относительная утечка воздуха при положении поршня в ВМТ в течение 5 с с 1,5 кгс/см² – 0,88
- расход картерных газов при 4000 мин⁻¹, л/мин – 41,0
- давление в главной масляной магистрали, кгс/см² – 3,90

Прогнозируемый остаточный ресурс ЦПГ двигателя по давлению в конце такта сжатия до достижения предельного состояния будет равен

$$t_o = 165 \left[\left(\frac{9,6 - 12}{10,8 - 12} \right)^{\frac{1}{1,3}} - 1 \right] = 123 \text{ тыс. км.}$$

По остальным диагностическим параметрам рассчитанные значения остаточного ресурса ЦПГ составят:

- по относительной утечке воздуха – 113 тыс. км
- расходу картерных газов – 106 тыс. км
- давлению в главной масляной магистрали – 88 тыс. км

В результате выполненных расчетов прогнозируемый остаточный ресурс ЦПГ принимает минимальное значение по параметру «давление в главной масляной магистрали», в соответствии с которым $t_o = 88$ тыс. км.

В условиях эксплуатации диагностирование автомобилей выполняют в основном при проведении плановых технических обслуживаний (ТО). В этом случае задача прогнозирования остаточного ресурса заключается в определении возможности их безотказной работы на наработке до выполнения очередного ТО. Если значение остаточного ресурса $t_o > t_d$, состояние диагностируемого механизма обеспечит его исправную работу до очередного ТО. В случае, если значение остаточного ресурса t_o меньше установленной периодичности диагностирования t_d , двигатель следует изъять из эксплуатации и направить в ремонт.

Процедуру прогнозирования можно упростить, заменив предельное значение диагностического параметра S_n допустимым нормативом S_d , который определяется из выражения (8.12).

Прогнозирование остаточного ресурса, т.е. оценка запаса исправной работы, – важнейший элемент в системе управления техническим состоянием автомобилей и его конструктивных элементов в эксплуатации. Отклонение значений диагностических параметров за допустимые пределы, вызываемые возникновением различных повреждений в элементах автомобиля, служит основой для принятия решения о проведении необходимых технических воздействий для восстановления его работоспособности.

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 понимают 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 понимают под «технической диагностикой» и «диагностированием» автомобилей?
9. Перечислите основные методы и средства диагностирования.
10. Что понимают под диагностическим параметром, оценивающим техническое состояние автомобилей?
11. Какие требования предъявляют к диагностическим параметрам?
12. Раскройте сущность нормирования диагностических параметров.
13. Как определяются предельные и допустимые значения диагностических параметров?
14. Что понимают под прогнозированием остаточного ресурса машин?
15. Перечислите методы определения оптимальной периодичности диагностирования автомобилей.
16. В чем заключается сущность управления техническим состоянием автомобилей на базе диагностической информации?
17. Что включает в себя типовое программное обеспечение системы управления техническим состоянием автомобилей?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение высокого уровня надежности и работоспособности технических систем – одна из важнейших задач машиностроения, решение которой возможно только при реализации комплекса взаимосвязанных мероприятий на всех этапах их проектирования, изготовления и эксплуатации.

Повышение уровня надежности технических систем достигается различными методами (резервированием элементов, рациональным выбором материалов пар трения, обеспечением нормальных условий их работы, внедрением новых упрочняющих технологий и т.д.). Решение о целесообразности проведения тех или иных технических мероприятий следует принимать по критерию минимальных затрат на их проведение и последующих расходов на поддержание работоспособности изделий в эксплуатации.

В учебном пособии раскрыты общие понятия науки о надежности, вопросы определения качества, основных свойств надежности, исправного, работоспособного и предельного состояний систем. Приведены классификация отказов автотранспортных средств, количественные показатели для оценки безотказности, долговечности, ремонтнопригодности и сохраняемости, а также показатели для комплексной оценки надежности.

Рассмотрены инженерно-физические основы надежности, устанавливающие основные причины потери машиной работоспособности (усталость металлов, остаточные деформации, старение, коррозия, изнашивание). Учитывая, что основная причина отказа – изнашивание, в пособии достаточное внимание уделено его физической сущности и факторам, влияющим на износостойкость изделий.

Существенным резервом в решении проблемы повышения надежности и работоспособности технических систем является информация об отказах и неисправностях этих систем, получаемая из сферы эксплуатации. В пособии изложен порядок сбора и обработки статистической информации об отказах автомобилей, описываемых различными законами распределения.

Материал пособия отражает вопросы, недостаточно освещенные в ранее опубликованной литературе, поэтому, несомненно, окажет помощь студентам, изучающим дисциплины «Основы теории надежности» и «Основы работоспособности технических систем» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аринин, И. Н. Техническая эксплуатация автомобилей / С. И. Коновалов, Ю. В. Баженов. – Ростов н/Д. : Феникс, 2004. – 315 с. – (Серия «Высшее профессиональное образование»). – ISBN 978-5-222-05101-3.
2. Баженов, Ю. В. Основы теории надежности машин : учеб. пособие / Ю. В. Баженов. – М. : Форум, 2014. – 320 с. – ISBN 978-5-91134-883-0.
3. Безверхний, С. Ф. Основы технологии полигонных испытаний и сертификация автомобилей / С. Ф. Безверхний, Н. Н. Яценко. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 600 с. – ISBN 978-5-7050-0460-5.
4. Болдин, А. П. Основы научных исследований : учебник / А. П. Болдин, В. А. Максимов. – М. : Академия, 2012. – 336 с. – ISBN 978-5-7695-7171-8.
5. Болдин, А. П. Надежность и техническая диагностика подвижного состава автомобильного транспорта : учеб. пособие / А. П. Болдин, В. И. Сарбаев. – М. : Изд-во МАИИ, 2010. – 206 с. – ISBN 978-5-85554-211-0.
6. ГОСТ 27002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 38 с.
7. ГОСТ 27578-87. Техническая диагностика. Диагностирование изделий. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 20 с.
8. Денисов, А. С. Обеспечение надежности автотракторных двигателей / А. С. Денисов, А. Т. Кулаков. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2007. – 422 с. – ISBN 978-5-7433-1784-4.
9. Денисов, А. С. Практикум по технической эксплуатации автомобилей / А. С. Денисов, А. С. Гребенников. – М. : Академия, 2012. – 272 с. – ISBN 978-5-7695-7183-1.
10. Димов, Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация : учеб. для вузов / Ю. В. Димов. – 2-е изд., доп. – СПб. : Питер, 2004. – 432 с. – ISBN 5-318-00428-8.

11. Емелин, М. И. Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации / М. И. Емелин, А. А. Герасименко. – М. : Машиностроение, 1980. – 224 с.

12. Зорин, В. А. Основы работоспособности технических систем : учеб. для вузов / В. А. Зорин. – М. : Магистр-Пресс, 2005. – 536 с. – ISBN 5-902048-51-6.

13. Колесник, П. А. Материаловедение на автомобильном транспорте : учеб. для вузов / П. А. Колесник, В. С. Кланица. – М. : Академия, 2012. – 320 с. – ISBN 978-5-7695-8507-4.

14. Кубарев, А. И. Надежность в машиностроении / А. И. Кубарев. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.

15. Кузьмин, Н. А. Техническая эксплуатация автомобилей: закономерности изменения работоспособности : учеб. пособие / Н. А. Кузьмин. – М. : ФОРУМ, 2011. – 208 с. – ISBN 978-5-91134-534-1.

16. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. РД 50-690-89. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 132 с.

17. Мирошников, Л. В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях / Л. В. Мирошников, А. П. Болдин, В. И. Пал. – М. : Транспорт, 1977. – 263 с.

18. Озорнин, С. П. Основы работоспособности технических систем : учеб. пособие / С. П. Озорнин. – Чита : Изд-во ЧитГУ, 2006. – 123 с.

19. Павлов, Е. В. Надёжность строительных и дорожных машин : учеб. пособие / Е. В. Павлов, А. Ф. Крюков. – Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2005. – 134 с.

20. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 532 с.

21. Ротенберг, Р. В. Основы надежности системы водитель – автомобиль – дорога – среда / Р. В. Ротенберг. – М. : Транспорт, 1986. – 215 с.

22. Сапронов, Ю. Г. Экспертиза и диагностика объектов и систем сервиса : учеб. пособие / Ю. Г. Сапронов. – М. : Академия, 2008. – 224 с. – ISBN 978-5-7695-4687-7.

23. Сергеев, А. Г. Метрология : учеб. пособие / А. Г. Сергеев. – М. : Логос, 2009. – 384 с. – ISBN 978-5-98704-443-8.

24. Синельников, А. Ф. Основы технологии производства и ремонт автомобилей : учеб. пособие / А. Ф. Синельников. – М. : Академия, 2011. – 320 с. – ISBN 978-5-7695-5906-8.

25. Справочник. Надежность в машиностроении / под общ. ред. В. В. Шашкина и Г. П. Карзова. – СПб. : Политехника, 1992. – 719 с. – ISBN 5-7325-0186-X.

26. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник / Е. С. Кузнецов [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 2001. – 535 с. – ISBN 5-02-002593-3.

27. Технология автомобилестроения : учебник / А. Л. Карунин [и др.] ; под ред. О. А. Дащенко. – М. : Трикта, 2005. – 624 с. – ISBN 5-902358-57-4.

28. Юркевич, В. В. Надежность и диагностика технологических систем : учебник / В. В. Юркевич, А. Г. Схиртладзе. – М. : Академия, 2011. – 304 с. – ISBN 978-5-7695-5990-7.

29. Яхьяев, Н. Я. Основы теории надёжности и диагностика : учебник / Н. Я. Яхьяев, А. В. Кораблин. – М. : Академия, 2009. – 256 с. – ISBN 978-5-7695-5734-7.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	5
1.1. Общие понятия о надежности и работоспособности	5
1.1.1. Классификация объектов и их состояний в эксплуатации	10
1.1.2. Отказы технических систем и их классификация	13
1.1.3. Свойства надежности технических систем	16
1.2. Количественные показатели свойств надежности	17
1.2.1. Показатели безотказности	18
1.2.2. Показатели долговечности	23
1.2.3. Показатели ремонтпригодности	25
1.2.4. Показатели сохраняемости	26
1.2.5. Комплексные показатели надежности	27
1.3. Оценка надежности автомобильного парка	28
Вопросы для самопроверки	33
Глава 2. ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСПЛУАТАЦИИ	34
2.1. Процессы изменения свойств и состояния конструктивных элементов технических систем	34
2.2. Эксплуатационное нагружение деталей машин	39
2.3. Причины нарушения работоспособности машин	43
2.3.1. Трение и изнашивание деталей	44
2.3.2. Пластическое деформирование деталей	51
2.3.3. Усталостное разрушение материалов деталей	55
2.3.4. Коррозионное разрушение деталей	63

2.3.5. Старение материалов конструктивных элементов	75
Вопросы для самопроверки	78
Глава 3. ВИДЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ.....	79
3.1. Классификация видов изнашивания	79
3.2. Закономерности изнашивания деталей.....	89
3.3. Количественные характеристики процесса изнашивания....	90
3.4. Предельные и допустимые износы	91
3.5. Методы измерения износа деталей и сопряжений	97
Вопросы для самопроверки	104
Глава 4. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	105
4.1. Зависимость интенсивности изнашивания от давления и скорости относительного перемещения.....	105
4.2. Влияние на изнашивание температуры поверхности трения	106
4.3. Зависимость интенсивности изнашивания от вида трения.....	108
4.4. Влияние на изнашивание смазочных материалов.....	115
4.5. Зависимость интенсивности изнашивания от механических характеристик и структуры материалов деталей	123
4.6. Влияние на изнашивание качества поверхности деталей.....	125
4.7. Влияние на изнашивание условий эксплуатации.....	130
Вопросы для самопроверки	135
Глава 5. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	136
5.1. Оценка надежности машин с использованием структурных схем.....	136
5.2. Цель и виды испытаний машин на надежность.....	141
5.3. Эксплуатационные испытания автомобилей на надежность	144

5.4. Полигонные испытания	147
5.5. Стендовые испытания.....	150
5.6. Ускоренные испытания	152
5.7. Определение объема выборки испытаний	154
Вопросы для самопроверки	157
Глава 6. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	158
6.1. Числовые характеристики случайных величин	158
6.2. Законы распределения случайных величин	159
6.3. Статистическая обработка информации о надежности	168
6.4. Обработка информации о надежности по результатам незавершенных испытаний	176
Вопросы для самопроверки	180
Глава 7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ.....	181
7.1. Конструктивные методы обеспечения надежности	185
7.1.1. Оптимизация компоновочного решения машины.....	185
7.1.2. Рациональный выбор материалов деталей пар трения.....	186
7.1.3. Оптимизация геометрической формы деталей узлов трения	191
7.1.4. Обеспечение нормальных условий работы деталей	192
7.1.5. Повышение уровня ремонтпригодности	194
7.1.6. Резервирование элементов и систем	196
7.2. Обеспечение надежности машин при их производстве	201
7.2.1. Требования к технологическим процессам изготовления деталей	201
7.2.2. Технологические методы упрочнения деталей	206
Вопросы для самопроверки	212

Глава 8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСПЛУАТАЦИИ	213
8.1. Факторы, влияющие на надежность машин в эксплуатации	213
8.2. Система технического обслуживания и ремонта машин	219
8.2.1. Стратегии технического обслуживания и ремонта	219
8.2.2. Техническое обслуживание автомобилей	222
8.2.3. Ремонт автомобилей и их агрегатов	228
8.3. Техническая диагностика машин	231
8.3.1. Основные понятия и определения.....	231
8.3.2. Методы и средства диагностирования.....	234
8.3.3. Диагностические параметры и обоснование их выбора.....	239
8.3.4. Нормирование диагностических параметров	245
8.3.5. Прогнозирование остаточного ресурса	251
Вопросы для самопроверки	257
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	258
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	260

Учебное издание

БАЖЕНОВ Юрий Васильевич
БАЖЕНОВ Михаил Юрьевич

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Редактор А. А. Амирсейидова
Технический редактор С. Ш. Абдуллаева
Корректор О. В. Балашова
Компьютерная верстка Е. А. Герасиной

Подписано в печать 20.10.17.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 15,58. Тираж 110 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.

