

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)
Институт машиностроения и автомобильного транспорта
Кафедра "Автотранспортная и техносферная безопасность"

Ю.В. БАЖЕНОВ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Владимир 2006

Оглавление

Введение	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	
НАДЕЖНОСТИ МАШИН	5
1.1. Общие понятия науки о надежности	5
1.2. Термины и определения	8
1.3. Количественные показатели надежности	14
1.3.1. Показатели безотказности	14
1.3.2. Показатели долговечности	19
1.3.3. Показатели ремонтпригодности	20
1.3.4. Показатели сохраняемости	22
1.3.5. Комплексные показатели надежности	22
1.4. Надежность парка автомобилей	23
1.4.1. Моделирование процессов функционирования АП и его надежности	25
1.4.2. Оценка показателей надежности автопарка по статистическим данным	26
Контрольные вопросы	30
2. ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	
НАДЕЖНОСТИ	30
2.1. Основные причины потери машиной работоспособности	31
2.2. Физическая сущность и закономерности изнашивания	36
2.3. Основные факторы, определяющие интенсивность изнашивания	41
2.3.1. Влияние на изнашивание вида трения	41
2.3.2. Зависимость интенсивности изнашивания от давления и скорости относительного перемещения	44
2.3.3. Влияние механических характеристик материалов на изнашивание	45
2.3.4. Влияние на изнашивание качества поверхности детали ..	46
2.3.5. Влияние на изнашивание условий эксплуатации	47
4. Предельные и допустимые износы	47
2.5. Методы определения износов	54
Контрольные вопросы	60
3. ИСПЫТАНИЯ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ	60
3.1. Цель и виды испытаний изделий машиностроения	60

3.2. Испытания автомобилей на надежность	
в процессе их эксплуатации	63
3.2.1. Эксплуатационные испытания	63
3.2.2. Полигонные испытания	64
3.2.3. Специальные испытания	67
3.3. Стендовые испытания	68
3.4. Ускоренные испытания	71
Контрольные вопросы	75
4. СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
О НАДЕЖНОСТИ МАШИН	75
4.1. Определение объема выборки обследований	75
4.2. Определение выборочных характеристик	79
4.2.1. Числовые характеристики случайной величины	79
4.2.2. Законы распределения случайных величин	80
4.3. Статистическая обработка информации о надежности	86
4.3.1. Порядок обработки опытных данных	86
4.3.2. Проверка гипотезы о принадлежности	
результатов исследований выбранному закону распределения	90
4.4. Обработка информации по надежности при незавершенных	
испытаниях	102
Контрольные вопросы	105
5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН НА ЭТАПАХ	
ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ	
5.1. Конструктивные методы обеспечения надежности машин	108
5.2. Обеспечение надежности машин при их производстве	120
5.3. Обеспечение надежности машин в эксплуатации	128
5.3.1. Условия эксплуатации автотранспортных средств	129
5.3.2. Организация ТО и ремонта	136
5.4. Техническая диагностика машин	139
5.4.1. Основные понятия. Системы диагностирования	139
5.4.2. Выбор диагностических параметров	143
5.4.3. Нормирование диагностических параметров	148
5.4.4. Прогнозирование остаточного ресурса машин	152
Контрольные вопросы	156
Заключение	157
Библиографический список	158

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

Анализ характера и причин отказов базируется на глубоких знаниях физической природы их возникновения и развития, т.е. знаний инженерно-физических основ надежности. Процессы, приводящие к потере машиной работоспособного состояния, включают в себя изнашивание, усталостное разрушение конструкционных материалов, пластические деформации, коррозию, старение.

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

Решение проблемы повышения надежности автотранспортных средств требует, прежде всего, наличия достоверной, систематической информации по их отказам и неисправностям, фактическим ресурсам, расходам запасных частей, трудоемкостям обслуживания и ремонта, а также факторам, влияющим на эти показатели в реальных условиях эксплуатации. Обработка такой информации позволяет оценить уровень фактической надежности той или иной модели автомобиля, агрегата, узла, детали, выявить слабые места в конструкции, разработать конкретные мероприятия по повышению эксплуатационной надежности и оптимизации системы поддержания автотранспортных средств в работоспособном состоянии. Обработка информации о надежности осуществляется методами математической статистики по показателям, оценивающим как отдельные свойства надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость), так и комплексными показателями, оценивающими несколько ее свойств одновременно.

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

Учебное пособие написано на основе курса лекций по дисциплине «Основы теории надежности и диагностика» и рассматривает комплекс проблем, перечисленных выше. Решение этих проблем имеет прикладное значение, так как способствует рациональной организации технической эксплуатации машин, обоснованию периодичностей и трудоемкостей технических воздействий при ТО и ремонте, снижению трудовых и материальных затрат на поддержание машин в работоспособном состоянии.

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

1.1. Общие понятия науки о надежности

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

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

Надёжность машины закладывается *при 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 надёжности 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 вторгается в сферы конструирования, производства и эксплуатации машин. Поэтому для решения задач, стоящих перед нею, привлекаются различные отрасли знаний.

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

- во-первых, изменение начальных параметров машины оценивается по наработке (или во времени);

- во-вторых, прогнозирование уровня работоспособности машины, сохранение ее выходных параметров осуществляется в зависимости от реальных условий эксплуатации.

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

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

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

Относительное изменение показателей качества машин связано с появлением новых, более совершенных машин, характеристики которых превосходят существующие, хотя в абсолютных значениях они могут не и 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 надежности относятся к 50-м годам XX столетия и были вызваны тем, что создаваемая тогда техника не обеспечивала достаточную эффективность ее использования из-за многочисленных отказов. Возникла необходимость в объективной оценке параметров надежности, особенно сложных систем, статистико-вероятностном описании наработок до отказа, обработке эксплуатационной информации о поведении машин во времени.

В связи с тем, что процессы, вызывающие отказы, подчиняясь определенным физическим закономерностям, имеют стохастическую (вероятностную) природу, их взаимосвязь с изменением выходных параметров машины довольно сложная. Поэтому *математические методы надёжно-*

сти основываются на теории вероятностей и математической статистике, а также смежных с ними дисциплин.

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

С появлением современных методов физических исследований и соответствующего экспериментального оборудования появилась возможность не только математического описания процессов изменения технического состояния изделий, но и объективно оценивать 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 (топливо, смазки и другие материалы). Сюда относятся отрасли знаний, изучающие процессы механического разрушения материалов (сопротивление материалов), изменения в материалах и поверхностных слоях деталей (физико-химическая механика, триботехника), химические процессы (коррозия, старение) и др. Результаты этих наук в теории надёжности сконцентрированы в области, которая носит название «физика отказов».

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

Современный уровень развития техники позволяет достичь практически любых показателей качества и надёжности машины. Однако затраты на достижение этой цели могут быть столь высоки, что эффект от повыше-

ния уровня надёжности не возместит их, и суммарный результат от проведенных мероприятий будет отрицательным. В связи с этим оценка достигнутого уровня надёжности и необходимость его повышения должна решаться в первую очередь с позиций экономики, так как экономика является основным критерием для решения большинства практических вопросов надёжности.

Сравнение различных вариантов достижения требуемого уровня надёжности должно исходить из условия получения наибольшего суммарного экономического эффекта с учетом затрат в сферах производства и эксплуатации машин и того положительного эффекта, который дает использование машины по назначению.

В общем случае изменение во времени суммарного экономического эффекта при эксплуатации машины складывается под влиянием двух основных факторов (рис. 1.1).

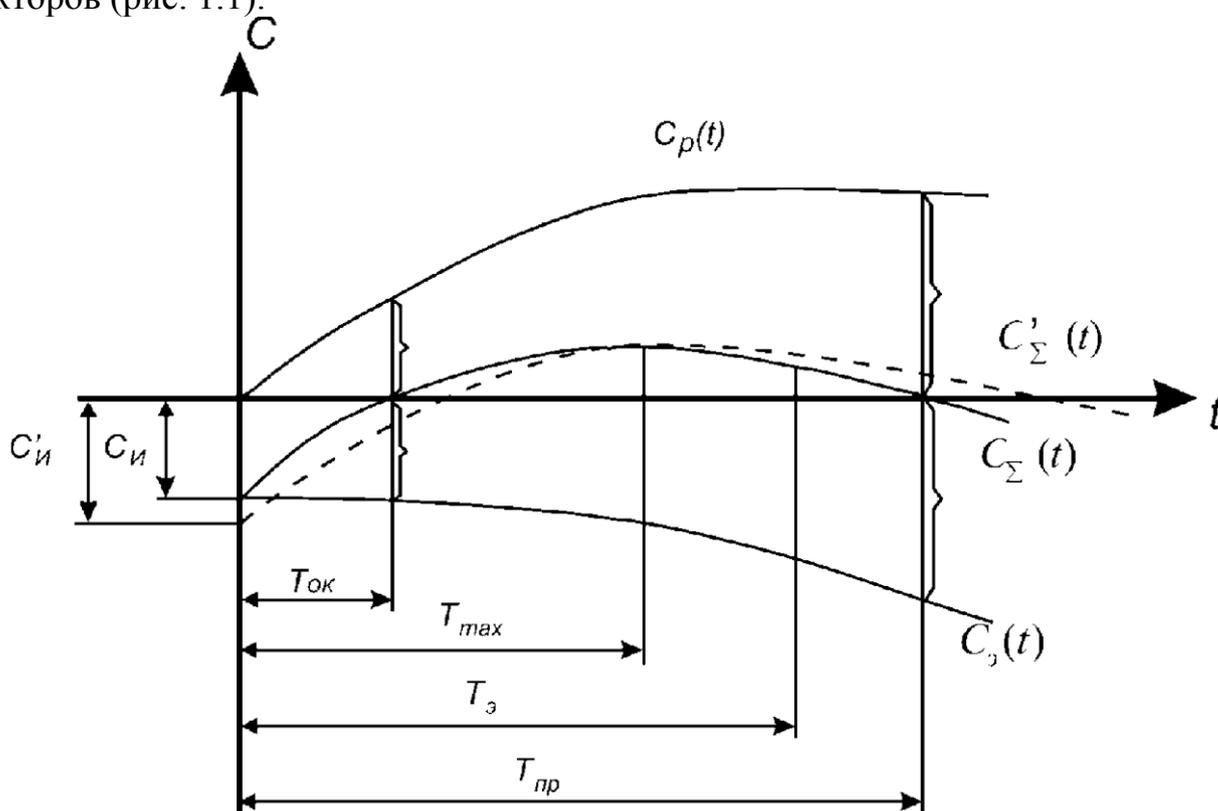


Рис. 1.1. Изменение экономической эффективности машины во времени

С одной стороны необходимо учитывать затраты на изготовление новой машины $C_{и}$, включая её проектирование, изготовление, испытание, отладку, транспортировку и др., а также затраты на эксплуатацию $C_{э}(t)$,

включая ТО, ремонт, хранение, т.е. всё то, что связано с поддержанием и восстановлением работоспособности машины. При этом $C_{и} + C_{э}(t)$ являются отрицательными в балансе эффективности.

С другой стороны, работа машины дает положительный экономический эффект $C_{р}(t)$, т.е. прибыль.

Изменение $C_{э}(t)$ в функции времени имеет тенденцию к возрастанию, так как износ и старение элементов машины приводят к необходимости вкладывания всё больших средств.

Изменение $C_{р}(t)$ наоборот, имеет тенденцию к уменьшению интенсивности роста, т.к. более частые простои машины в ремонте и техническом обслуживании снижают её производительность. Поэтому кривая суммарной эффективности $C_{\Sigma}(t) = C_{и} + C_{э}(t) + C_{р}(t)$ имеет максимум и два раза пересекает ось абсцисс t .

Период $t = T_{ок}$, когда машина возвратила затраты, которые в неё были вложены, называется *сроком окупаемости*. С этого момента машина начинает приносить прибыль. Однако прирост получаемого эффекта постепенно снижается из-за возрастания эксплуатационных затрат до $t = T_{пр}$, когда снова $C_{и} + C_{э}(t) = C_{р}(t)$. При $t > T_{пр}$ затраты на эксплуатацию превышают тот экономический эффект, который может обеспечить машина.

Длительность экономически целесообразной эксплуатации машины $T_{э}$ находится в диапазоне между T_{max} и предельным сроком её службы $T_{пр}$, т.е. $T_{max} < T_{э} < T_{пр}$.

Выбор варианта с позиции надёжности должен исходить из сравнения затрат на изготовление, эксплуатацию и экономическим эффектом от работы машины. Например, при более высокой первоначальной стоимости 2-го варианта машины $C_{и}'$ экономический эффект от её работы $C_{\Sigma}'(t)$ выше за счет улучшения показателей надёжности.

1.2. Термины и определения

Каждое техническое устройство, в том числе и автомобиль, характеризуется определенными выходными параметрами, т.е. величинами, определяющими показатели качества. Эти параметры могут характеризовать самые разнообразные свойства машины в зависимости от её назначения и тех требований, которые к ней предъявляются. Применительно к автомобилям основными свойствами, характеризующими их качество, являются:

грузоподъёмность, маневренность, безопасность, динамичность, производительность, топливная экономичность и другие свойства, закладываемые при проектировании и производстве автомобиля.

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

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

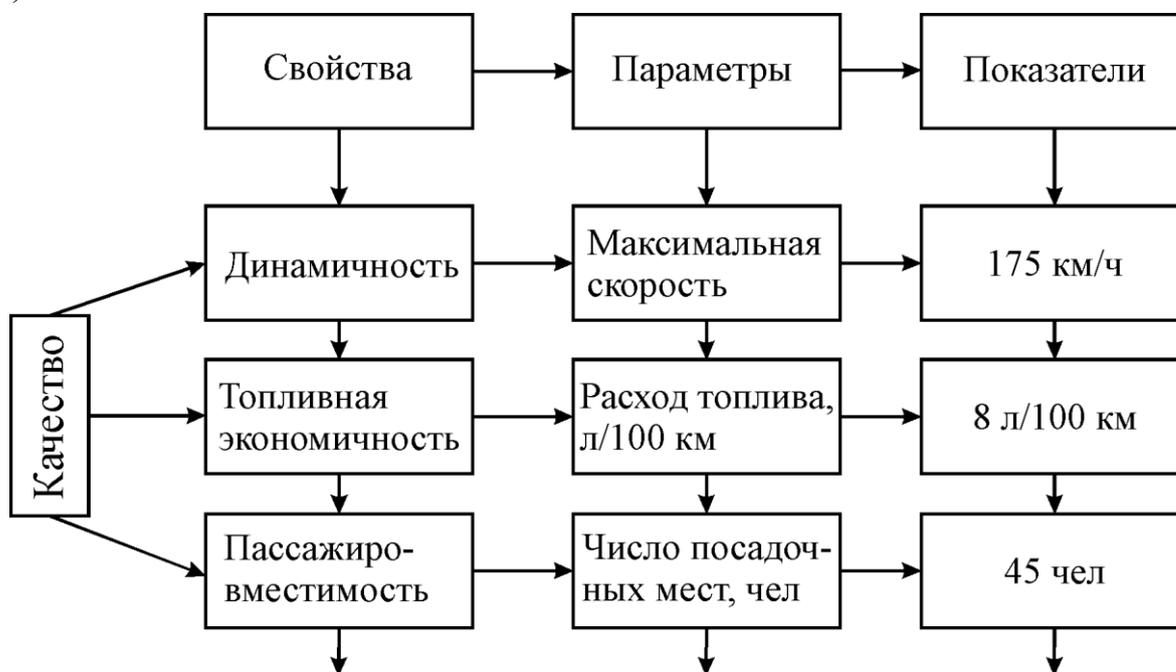


Рис.1.2. Структура понятия качества автомобиля

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

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 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, хорошо сконструированный, качественно изготовленный, всесторонне испытанный и правильно эксплуатируемый автомобиль в течение всего ресурсного пробега должен работать без каких-либо простоев, кроме предусматриваемых в плановом порядке или вызванных организационными причинами.

1.2.1. Классификация объектов и их состояний

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

В соответствии с возможностью восстановления утраченной в процессе эксплуатации работоспособности объекты подразделяются на восстанавливаемые (ремонтируемые) и невосстанавливаемые (неремонтируемые).

Восстанавливаемыми объектами называют такие объекты, для которых восстановление работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической документации. Такие объекты после проведения необходимых ремонтных операций продолжают выполнять свои функции. Типичными примерами восстанавливаемых объектов являются 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 объектами называют объекты, для которых при потере работоспособности проведение ремонтных работ не предусмотрено нормативно-технической документацией. Такие изделия подлежат замене после первого отказа. Примерами таких изделий являются электронные приборы в системах управления современного автомобиля, подшипники качения, тормозные колодки и др.

Большинство объектов автостроения (автомобили, агрегаты, системы) относятся к восстанавливаемым. При этом, если при ремонте объекта, двигателя, например, часть отказавших элементов заменяются на новые

(топливные форсунки, свечи зажигания и т.п.), то двигатель является восстанавливаемым объектом, а заменяемые отказавшие элементы - невосстанавливаемыми.

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

Таковыми параметрами объектов автотранспортной техники могут быть:

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

Различают следующие пять основных видов технического состояния автомобиля:

- исправное;
- работоспособное;
- неисправное;
- неработоспособное;
- предельное.

Исправное состояние – это нормальное и естественное состояние автомобиля, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документации (НТД). Исправное состояние является наиболее продолжительным в жизненном цикле автомобиля и нормальным с позиции эксплуатации. Поддержание исправного состояния безусловно требует определённых эксплуатационных затрат на выполнение предусмотренных работ по ТО и ремонту, включая контроль и диагностику.

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

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

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

Предельным называется состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Невозможность дальнейшего применения объекта может являться следствием неустранимого нарушения требований безопасности, неустранимого ухода заданных параметров (параметра) за установленные пределы, неустранимого снижения эффективности эксплуатации, необходимостью капитального ремонта.

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

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

1.2.2 Отказы машин и их классификация

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

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 повреж-

дений, как мелкие трещины, небольшие деформации, потертости изоляции, нарушения регулировок в случае их длительного неустранения приводят к нарушению функционирования, т.е. потере работоспособности.

Причины, по которым объект теряет свою работоспособность можно разделить на две 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.).

Современный автомобиль включает в себя от 15 до 25 тыс. деталей, составляющих его агрегаты, системы, узлы и механизмы. Примерно 20 – 22% из них относятся к деталям, лимитирующим надежность (срок их службы меньше срока службы автомобиля), а около 200 – 300 деталей являются критическими по надежности (срок их службы не превышает одного года).

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

Таблица 1.1

Характер отказа	Примеры отказавших элементов
Износ	Рабочие поверхности деталей
Трещина	Рама, кузова, детали
Остаточная деформация	Кузова, зубья шестерен, шлицевые соединения
Коррозия	Поверхности металлоконструкций
Повреждение резьбы	Винтовые и резьбовые соединения
Поломка	Болты, шпильки и штифты
Ослабление посадки	Отверстия под подшипники, втулки
Пробоина	Корпусные детали, баки, поддоны картеров, шины колес
Потеря упругости	Пружины
Нарушение регулировки	Углы установки колес, тормозные системы
Ослабление крепления	Винтовые и резьбовые соединения
Разрыв	Трубопроводы, шланги, ремни и цепи передач
Растрескивание, расслоение	Шланги, ремни, шины колес
Нарушение герметичности	Гидравлические и пневматические системы

Характер отказа	Примеры отказавших элементов
Потеря эластичности, старение	Резинотехнические изделия, уплотнения
Электрическое повреждение (пробой, замыкание, обрыв, нарушение контакта)	Элементы электропривода
Перегорание	Приборы освещения

Для предупреждения отказов необходимо знать причины их возникновения и проявления, а также влияние на работоспособность автомобиля. В зависимости от этих факторов рекомендуется следующая классификация основных отказов автомобилей.

По источнику и причинам возникновения отказы подразделяются на конструктивные, производственные и эксплуатационные.

Конструктивные отказы возникают по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования. Главным образом они обусловлены недостатками конструкции автомобиля. Например, неудачно выполнена конструктивная схема, не учтены условия эксплуатации, детали плохо защищены от попадания абразивов и влаги.

Производственные отказы возникают из-за несовершенства или нарушения технологического процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии. Например, отклонение размеров детали от заданных, 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, недостаточный уровень производственно-технического персонала могут привести к преждевременным отказам.

По характеру изменения параметра технического состояния отказы подразделяются на постепенные и внезапные.

Постепенными называют отказы, которые возникают в результате протекания того или иного процесса старения, ухудшающего начальные параметры элементов автомобиля. Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $P(t)$ в течение задан-

ного пробега от t_1 до t_2 зависит от длительности предыдущей работы (рис. 1.3, а).

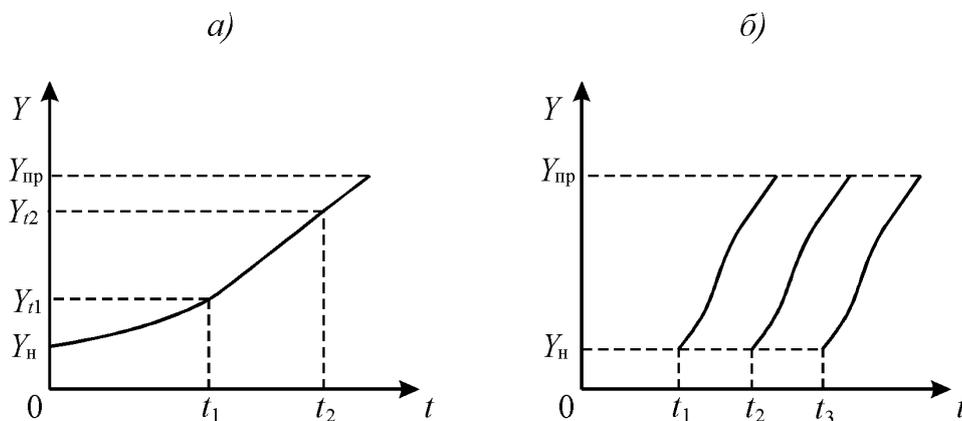


Рис.1.3. Изменение параметра технического состояния Y по наработке t при постепенных (а) и внезапных (б) отказах:

Y_n ; $Y_{пр}$ – начальное и предельное значения параметров

Чем больше наработка автомобиля, тем выше вероятность возникновения отказа, т.е.

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

Это связано с тем, что в процессе эксплуатации по мере выработки заложенной долговечности происходит накопление необратимых изменений в объекте, обусловленных износом и старением материалов, накоплением усталостных повреждений, а также коррозионными, эрозийными и другими воздействиями. К этому виду отказов относится большинство отказов автомобиля.

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

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

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

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, мини-

мальная твёрдость, повышенная температура и т.д). Выход из строя при этом происходит, как правило, внезапно, без предшествующих симптомов.

По внешним проявлениям отказы делятся на явные и скрытные.

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

К *скрытным* относятся отказы, которые не могут быть обнаружены визуально или штатными методами и средствами контроля. Их выявление требует специальных средств диагностирования и увеличенных норм времени.

По взаимосвязи отказы подразделяются на зависимые и независимые.

К *зависимым* относятся отказы, возникновение которых явилось следствием других отказов (повышенный износ деталей двигателя из-за неисправностей в системе смазки, отказ редуктора заднего моста вследствие выкрашивания 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.).

По своим последствиям отказы подразделяются на отказы функционирования и параметрические.

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

Параметрический отказ приводит к выходу параметров (характеристик изделия) за допустимые пределы. Такие отказы, например, как снижение мощности, топливной экономичности, увеличение зазоров в сопряжениях не ограничивают дальнейшую эксплуатацию автомобиля, однако выполняемые им функции не удовлетворяют требованиям экономичности, точности и эффективности.

По месту возникновения отказы подразделяются на линейные и выявленные в нерабочее время автомобиля.

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

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

1.2.3. Свойства надежности машин

Надёжность является сложным (комплексным) свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетания более простых свойств:

- безотказности;
- долговечности;
- ремонтпригодности;
- сохраняемости.

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

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

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

Ремонтпригодность - это свойство автомобиля, определяющее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонта.

Это свойство, с одной стороны, характеризует 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

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

Сохраняемость - это свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение и после срока хранения и (или) транспортирования.

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

1.3 Количественные показатели надёжности

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 для оценки надёжности применяются количественные показатели её отдельных свойств (безотказности, долговечности, ремонтпригодности 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).

1.3.1. Показатели безотказности

Для количественной оценки безотказности используют следующие показатели:

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

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

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

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

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

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

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

$$P(t) + F(t) = 1. \quad (1.1)$$

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

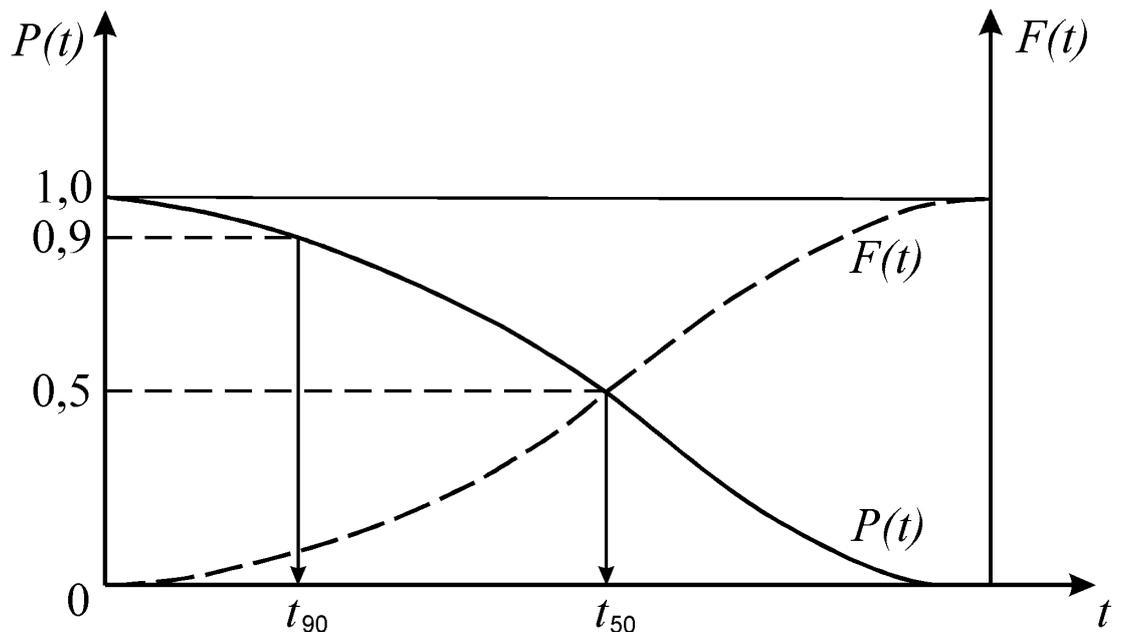


Рис. 1.4 Изменение вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$ по наработке t

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

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad , \quad (1.2)$$

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

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

$$\bar{P}(t) = \frac{N - \sum_{j=1}^r m_j}{N} \quad , \quad (1.3)$$

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.

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

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{T}{n} \quad , \quad (1.4)$$

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 ,

$$\bar{t} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_r t_r}{m_1 + m_2 + \dots + m_r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r m_j t_j \quad , \quad (1.5)$$

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 восстанавливаемых изделий до первого отказа. Статистическая оценка это-

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

$$\bar{t}_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j, \quad (1.6)$$

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:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t}. \quad (1.7)$$

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

$$P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t)\Delta t, \quad (1.8)$$

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

Из этого соотношения интенсивность отказов определяется выражением

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (1.9)$$

Статистическая оценка этого показателя по результатам экспериментальных исследований находится по формуле

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (1.10)$$

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

Из выражения (1.10) 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

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{m(t + \Delta t) - m(t)\}}{\Delta t}, \quad (1.11)$$

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

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

$$\bar{\omega} = \frac{m(t_2) - m(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (1.12)$$

По сравнению с формулой (1.11) здесь рассматривается число отказов за конечный отрезок времени (t_1, t_2) , причем $t_1 \leq t \leq t_2$.

Ресурсные испытания и наблюдения за большими выборками объектов показывает, что в большинстве случаев изменение параметра потока отказов $\omega(t)$ протекает во времени или по наработке немонотонно (рис. 1.5). На участке I происходит нарастание потока отказов, которое связано с выходом из строя деталей и узлов, имеющих дефекты изготовления и сборки (участок приработки). На участке II поток отказов можно считать постоянным, это участок нормальной эксплуатации машины, на котором происходят, главным образом, внезапные отказы.

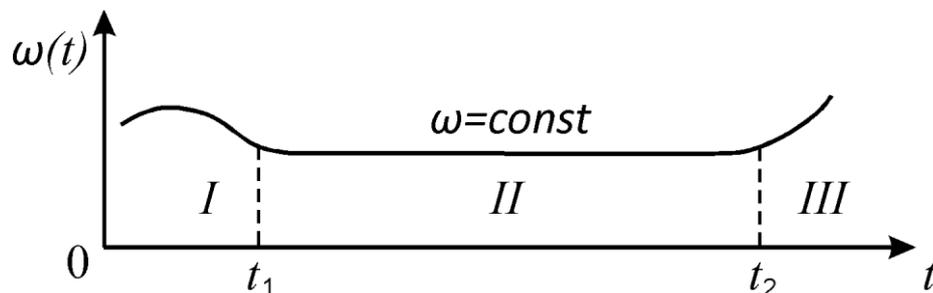


Рис. 1.5. Изменение параметра потока отказов ω по наработке t

На участке III параметр потока отказов $\omega(t)$ резко возрастает вследствие изнашивания, старения, накопления повреждений и других процессов в узлах и деталях машины. Когда поток отказов достигает определен-

ного уровня, дальнейшая эксплуатация становится нецелесообразной и машина направляется или в капитальный ремонт, или на списание.

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

$$m_{cp}(t) = \omega(t)\bar{t} \quad (1.13)$$

Наработка на отказ \bar{t} за любой период работы Δt на II участке равна

$$\bar{t} = \frac{1}{\omega(t)} = const \quad (1.14)$$

1.3.2. Показатели долговечности

Для оценки долговечности машин используются следующие показатели:

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

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

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

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

Средний ресурс определяется по формуле

$$\bar{T}_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad , \quad (1.15)$$

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

Гамма-процентный ресурс - это наработка, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Гамма-процентный ресурс легко определяется по графику вероятности безотказной работы $P(t)$ (рис. 1.6, а).

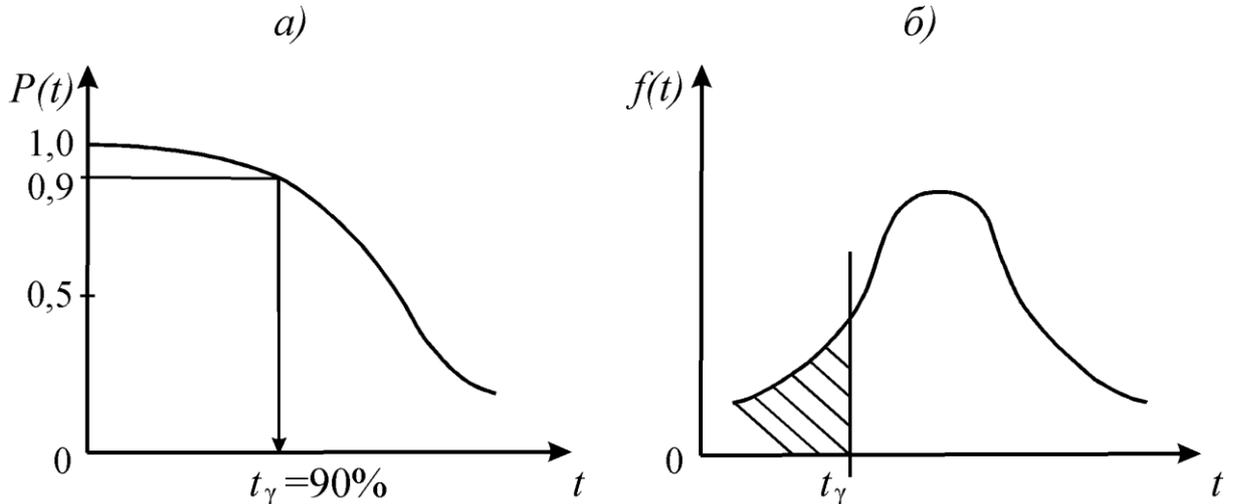


Рис. 1.6. Схема определения γ -процентного ресурса

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

Для партии изделий γ -процентный ресурс представляет собой наработку, которую имеют или превышают обусловленный процент изделий γ (рис. 1.6, б). Вертикальная линия с абсциссой, равной γ -процентному ресурсу, пересекает 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

$$1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t) dt = \frac{\gamma}{100} \quad (1.16)$$

1.3.3. Показатели ремонтпригодности

Для оценки ремонтпригодности изделий служат следующие основные показатели:

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

Вероятность восстановления отказа в заданное время - это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния не превысит заданное значение.

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

$$\bar{t}_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i, \quad (1.17)$$

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 (1.17), только вместо времени восстановления подставляется трудоемкость в чел.-ч.

Дополнительными показателями для комплексной оценки ремонтпригодности автомобилей используются: удельная продолжительность, удельная трудоемкость и удельная стоимость ТО и ремонтов.

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

В течение заданной наработки машины, например до капитального ремонта, для поддержания ее работоспособности многократно выполняются различные виды профилактических и ремонтных работ. Для определения этого показателя необходимо установить методом хронометража сум-

марное время на ТО и ремонты и разделить его на ту наработку, в течение которой проводился контроль

$$\bar{\tau}_{\text{ТО-ТР}} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{i\text{ТО-ТР}}}{NT} \quad (1.18)$$

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

Удельная трудоемкость и удельная стоимость ТО и ремонтов определяются аналогичным образом с той лишь разницей, что вместо времени на выполнение работ в формулу подставляются трудоемкость в чел.-ч или стоимость в руб.

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

1.3.4. Показатели сохраняемости

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

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

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 срок сохраняемости, который будет достигнут изделием с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

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

При соблюдении технологии хранения и консервации изделия должны отвечать всем требованиям, предъявляемым к ним техническими усло-

виями после обусловленного срока хранения. Например, если 90% - й срок сохраняемости изделия равен двум годам, то после двухлетнего срока хранения 90 изделий из 100 будут полностью соответствовать требованиям технической документации.

1.3.5. Комплексные показатели надежности

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

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

$$K_G = \frac{t_{\Sigma pc}}{t_{\Sigma \Delta}} = \frac{t_{\Sigma pc}}{t_{\Sigma pc} + t_{\Sigma p}}, \quad (1.19)$$

где $t_{\Sigma pc}$ - суммарное время пребывания изделия в работоспособном состоянии в интервале наработки между плановыми ТО; $t_{\Sigma p}$ - суммарные простои изделия в ремонте за этот же период.

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 простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период:

$$K_{ТИ} = \frac{t_{\Sigma pc}}{t_{\Sigma pc} + t_{\Sigma p} + t_{\Sigma то}}, \quad (1.20)$$

где $t_{\Sigma pc}$ - суммарное время нахождения изделия в работоспособном состоянии на заданной наработке; $t_{\Sigma p}$, $t_{\Sigma то}$ - суммарные простои изделия из-за отказов (в ремонтах) и при профилактических технических обслуживаниях за эту наработку.

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

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

1.4. Надежность парка автомобилей

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

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

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

1. Автомобиль является изделием, обладающим конечным ресурсом, в то время как АП - это непрерывно обновляемая система за счет списания выработавших ресурс и введения новых автомобилей.

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 потребо-

вать глубокого вмешательства в конструкцию, а во втором замена или резервирование целых автомобилей осуществляются значительно проще.

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

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

Надежность среднесписочного автомобиля с достаточной точностью характеризует коэффициент технической готовности α_t , (относительное число работоспособных автомобилей). Обобщенную оценку надежности АП дает суммарное число автомобилей, направленных заказчику - α_b (коэффициент выпуска автомобилей на линию).

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

1.4.1. Моделирование процессов функционирования АП и его надежности

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

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

В действительности в зависимости от организации эксплуатации и других факторов, технологические состояния автомобиля более разнообразны. С точки зрения надежности АП их можно разбить на линейные, когда автомобиль работоспособен и поступает на линию, 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), списания, подготовкой нового автомобиля к эксплуатации,

доводкой и обкаткой капитально отремонтированных агрегатов и узлов, простоями автомобилей после ДТП и т. д. Простои по организационным причинам связаны с отсутствием заказчика транспортных услуг, горюче-смазочных материалов, шин, аккумуляторных батарей, водителей, ремонтных рабочих по причине неукomплектованности штатов, болезней, отпусков или выходных дней.

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 автомобиля, помимо работы на линии (состояние S_1), проходят общее Д-1 и углубленное Д-2 диагностирования (состояния S_3 и S_4), плановые ТО-1 и ТО-2 (состояния S_5 и S_7), текущий ремонт (состояние S_6). В случае занятости постов ТО, ремонта или диагностирования автомобиля простаивают в ожидании соответствующих технических воздействий (состояние S_2), а исправные автомобили направляются в зону хранения (состояние S_8).

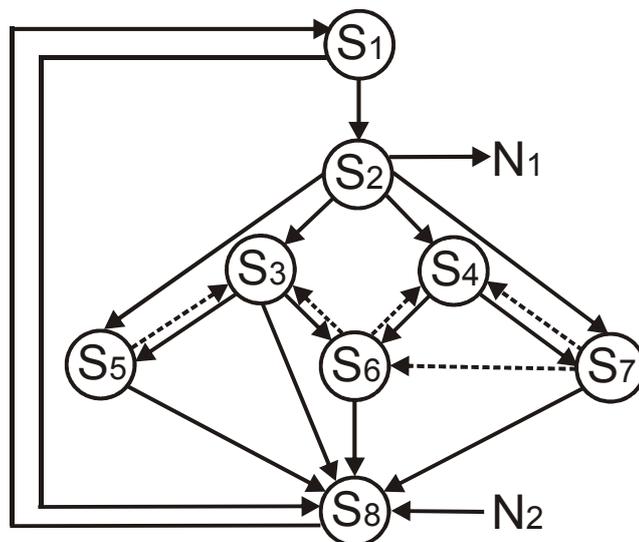


Рис. 1.7. Обобщенный граф возможных состояний автомобилей

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

автомобилей из АП, вызванное их списанием или продажей, а N_2 - поступление вновь приобретенных автомобилей.

С точки зрения организации эксплуатации автомобилей и 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. Более точную и достоверную оценку позволяет получить метод статистического анализа, так как он основан на базе существующей системы учета и оценок работы АП.

1.4.2. Оценка показателей надежности автопарка по статистическим данным

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

Рассмотрим метод статистического анализа показателей надежности АП на примере.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за техническим состоянием автомобилей конкретного АТП в течение полугода были получены следующие статистические данные (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Списочное количество автомобилей, $N_{сп}$	Кол-во автомобилей на линии, $N_{л}$	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
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

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

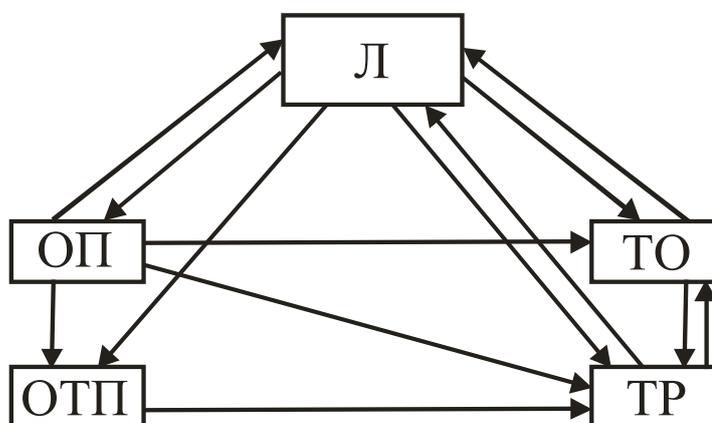


Рис. 1.8. Граф состояний автомобилей в рассматриваемом АТП

Граф включает в себя следующие состояния: работу на линии - Л, простои в техническом обслуживании - ТО, простои в 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 можно принять отношение математического ожидания числа автомобилей, соответствующего состоянию Л, к среднесписочному числу автомобилей в АТП, равным коэффициенту выпуска автомобилей на линию α_B ; отношение суммы математических ожиданий автомобилей по состояниям Л и ОП к среднесписочному числу автомобилей - коэффициенту технической готовности α_T .

Обработка статистических данных табл. 1.2 может быть выполнена на ЭВМ по программе, алгоритм которой представлен на рис. 1.9.

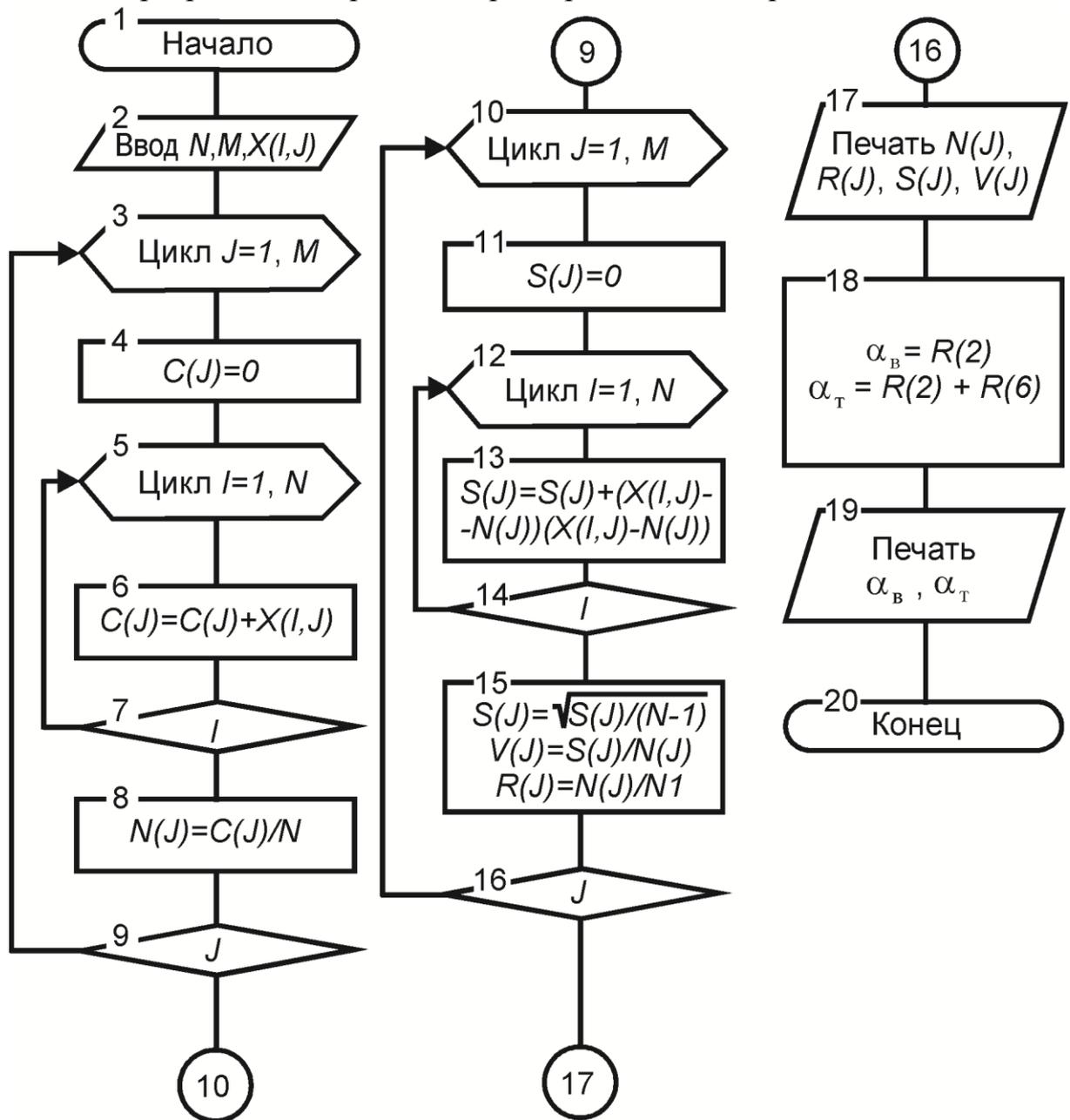


Рис. 1.9. Алгоритм программы расчета показателей надежности автопарка:
M - число столбцов матрицы; *N* - число строк; *J* - номер столбца; *I* - номер строки;
X(I, J) - элементы массива; *N(J)* - среднее статистическое (математическое ожидание); *S(J)* - среднееквадратичное отклонение; *V(J)* - коэффициент вариации;
R(J) - относительная величина математического ожидания; α_B - коэффициент выпуска автомобилей на линию; α_T - коэффициент технической готовности;
C(J) - сумма элементов массива данных

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

Таблица 1.3

Характеристики надежности АТП	Состояние				
	Работа на линии, $\bar{N}_л$	ТО	ТР	ОТП	ОП
1. Математическое ожидание количества автомобилей в \bar{N} в j -м состоянии	283,44	4,5	47,13	8,06	9,87
2. Относительная величина математического ожидания $\bar{R}_j = \bar{N}_j / \bar{N}_{сп}$	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 ($\alpha_B = \bar{R}_л = 0,803$) и стабильный ($v = 0,019$). Коэффициент технической готовности, учитывающий работу автомобилей на линии и их простои по организационным причинам, составил

$$\alpha_T = \bar{R}_e + \bar{R}_н = 0,803 + 0,028 = 0,831.$$

+

Контрольные вопросы

1. Какие проблемы изучает наука о надежности машин?
2. На каких отраслях знаний базируется наука о надежности?
3. В чем заключается экономический аспект науки о надежности?
4. Раскройте понятия качества и надежности машин.
5. Какие виды технических состояний составляют жизненный цикл автомобиля?
6. Приведите классификацию отказов автомобилей.
7. Какими свойствами характеризуется надежность изделий?

8. Какими показателями оценивают безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость машин?

9. Укажите взаимосвязь между вероятностью безотказной работы $P(t)$, вероятностью отказов $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$.

10. Какие показатели используются для комплексной оценки надежности изделий?

11. Какими показателями можно оценить надежность парка автомобилей?

Глава 2. ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ НАГРУЖЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

При эксплуатации машин, а также в период их хранения в них непрерывно протекают различные физические процессы, которые приводят к изменению параметров отдельных элементов и машины в целом.

Процессы, приводящие к изменению начальных свойств, протекают в материалах, из которых создано изделие, включая не только детали, но и смазку, топливо, т.е. все, что участвует в рабочем процессе. Следует иметь в виду, что процессы, возникающие в результате действия того или иного вида энергии, часто не сразу приводят к повреждению. Существует так называемый период накопления воздействий, прежде чем начнется период внешнего проявления процесса, т.е. повреждения. Например, для начала развития усталостной трещины необходимо определенное число циклов переменных напряжений. В отличие от усталости процесс изнашивания начинается сразу же после начала эксплуатации.

Основной причиной протекания таких процессов является то, что при работе машин в их узлах, агрегатах, элементах возникают различные виды энергии (механической, тепловой, химической, электрической), которые, воздействуя на них, приводят к различным эксплуатационным повреждениям (износам, деформациям, поломкам, коррозии и др.). Это, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных параметров и, в конечном счете, к потере работоспособности (отказу). В упрощенной форме этот процесс представлен на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Схема формирования процесса реализации машиной работоспособности

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

- внутренние источники энергии, связанные с рабочими процессами агрегатов и механизмов;
- потенциальная энергия, накопленная в элементах конструкции машины в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливке, штамповке, термической обработке деталей и т.д.);
- энергия окружающей среды.

Значительная часть этой энергии расходуется на совершение полезной работы, а часть энергии в виде статических или динамических нагрузок воздействует на конструктивные элементы машин, вызывая в них различного рода эксплуатационные нагружения.

2.1. Виды эксплуатационных нагружений конструктивных элементов машин

Эксплуатационным нагружением называется совокупность внешних факторов, воздействующих на конструктивный элемент машины в процессе эксплуатации. В зависимости от этих факторов различают следующие виды эксплуатационных нагружений:

- силовое;
- термомеханическое;
- под воздействием трения сопряженных деталей;
- коррозионное.

Под *силовым нагружением* понимают воздействие на элемент конструкции внешней сосредоточенной или распределенной силы, вызывающей в материале соответствующее противодействие в форме распределенных по сечению внутренних сил.

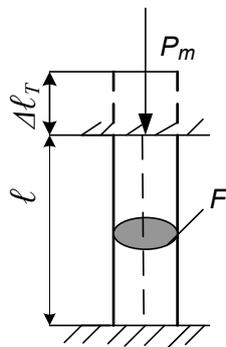
Количественной оценкой силового эксплуатационного нагружения служит напряжение нагружения

$$\sigma_H = \frac{P_B}{F}, \quad (2.1)$$

где P_B – сила воздействия на элемент конструкции, Н; F – площадь сечения элемента, м^2 .

В международной системе единиц (СИ) напряжение нагружения σ_H измеряется в мегапаскалях МПа ($1\text{МПа} = 10^6 \text{ Па}$), а $1\text{Па} = 1\text{Н}/\text{м}^2$.

Термомеханическое эксплуатационное нагружение обусловлено тепловым удлинением элемента конструкции при ограничении его деформирования. Механизм такого нагружения представлен схемой рис.2.2.



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

$$\Delta l_T = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot l, \quad (2.2)$$

где α_T – коэффициент линейного расширения; ΔT – перепад температур; l – длина конструктивного элемента.

Рис.2.2. Схема термомеханического нагружения

Относительное удлинение (деформация) составит

$$\Delta l_T / l = \alpha_T \cdot \Delta T.$$

В условиях ограниченного деформирования конструктивный элемент сжимается осевой силой P_T

$$P_T = \sigma_H \cdot F, \quad (2.3)$$

где σ_H – напряжение термомеханического нагружения; F – площадь поперечного сечения конструктивного элемента.

Возникающее в результате нагревания напряжение пропорционально относительному удлинению элемента и перепаду температур

$$\sigma_H = \alpha_T \cdot E \cdot \Delta T, \quad (2.4)$$

где E – модуль продольной упругости.

Чаще всего термомеханическое нагружение обусловлено неравномерным нагреванием элемента конструкции. При неравномерном распределении температуры более нагретые слои детали, расширяясь, растягивают менее нагретые, сами при этом испытывая сжимающие напряжения.

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

Эксплуатационное нагружение под воздействием трения возникает в элементах конструкции, находящихся в относительном движении. Упрощенная схема воздействия сил на элемент конструкции при таком нагружении представлена на рис.2.3.

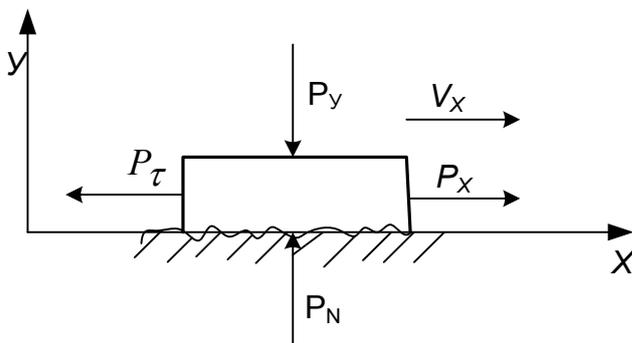


Рис.2.3. Схема эксплуатационного нагружения под воздействием трения; P_y – осевая сила (сила прижатия); P_N – нормальная сила реакции; P_x – осевая сила; P – сила трения; V_x – линейная осевая скорость движения

В любой машине имеется большое число сопряженных элементов движущихся относительно друг друга. При этом возникает сила сопротивления перемещению (сила трения) P_τ , которая зависит от процесса взаимодействия поверхностных слоев сопряженных деталей.

Если осевая сила P_x недостаточна, чтобы преодолеть силу трения P_τ , деталь остается в покое. Деталь начнет перемещаться в момент, когда осевая сила превзойдет по величине *силу трения*. Наибольшая величина силы трения, после преодоления которой, деталь начнет двигаться, называется *силой трения покоя*.

При нормальной работе сопряжения *сила трения скольжения* меньше *силы трения покоя* и при установившейся силе прижатия P_y остается

постоянной во времени. В практических расчетах сила трения скольжения определяется из выражения

$$P_{\tau} = f \cdot P_N \quad (2.5)$$

где f – коэффициент трения, величина которого зависит от материала деталей сопряжения, условий смазки и других конструктивных и эксплуатационных факторов.

Коррозионное воздействие представляет собой процесс разрушения материалов деталей в результате их физико-химического взаимодействия с внешней агрессивной средой.

Согласно общепринятой теории коррозия металлов представляется элементарными электрохимическими процессами, протекающими на отдельных участках деталей вследствие разной поверхностной защиты и, следовательно, разной поглощаемостью кислорода. На участке поверхности, контактирующей с агрессивной средой, образуется большое количество электролитических пор, в которых ионы металла переходят в раствор вблизи анодных элементов. В результате возникающих реакций часть металла окисляется с образованием гидратированной окиси железа $F_2O_3(H_2O)_2$, т.е. ржавчины.

Коррозия является одним из наиболее опасных видов разрушения деталей машин. Ею поражаются нагруженные элементы шасси, кабин, кузовов, сварные соединения и другие детали автомобилей.

2.2. Режимы силового нагружения

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

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

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

где φ_D – коэффициент деформации, зависящий от схемы силового нагружения и формы поперечного сечения детали; \bar{P} – математическое ожидание внешней силы, действующей на деталь; F – площадь поперечного сечения детали.

Внешним проявлением силового нагружения является изменение формы элемента конструкции, т.е. его деформация (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб и др.).

Разновидностью силового нагружения является *контактное нагружение*, когда усилие от одной детали конструкции передается другой по небольшой по сравнению с размерами этих деталей площадке их контакта. Возникающее при этом напряжение называют *контактным напряжением нагружения* элемента конструкции

Величина контактного напряжения нагружения зависит от нагружающей силы P , упругих свойств материалов элементов конструкции, а также формы и размеров контактирующих поверхностей. В зависимости от формы сопряжения элементов изделия различают две модели контакта поверхностей - в виде прямоугольника или эллипса (рис.2.4).

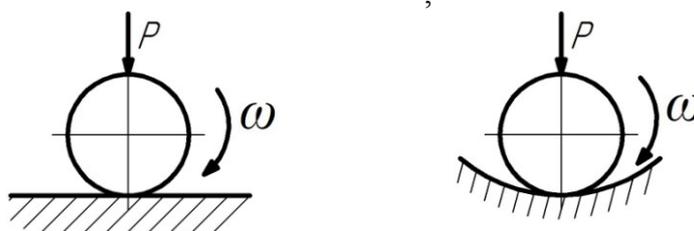


Рис. 2.4. Примеры схем силового контактного нагружения

При *динамическом режиме нагружения* действующая на конструктивные элементы 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, 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

$$\sigma_H(t) = \varphi_D \cdot \frac{P(t)}{F(t)}, \quad (2.7)$$

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

Таким образом, в отличие от статического напряжения $\sigma_H(t)$ при динамическом режиме нагружения 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, эрозии поверхностного слоя.

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

Ударное эксплуатационное нагружение элементов конструкции происходит за очень короткий период времени ($t \rightarrow 0$). В воспринимающей ударную нагрузку элементе кинетическая энергия практически превращается в динамическую, деформирующую деталь. Примером ударного нагружения является нагрузка на рессору автомобиля при попадании колес в глубокую выемку на дороге. Эксплуатационное нагружение в этом случае определяется из выражения

$$P_y = k_y \cdot P, \quad (2.8)$$

где k_y – коэффициент ударной динамичности.

Этот коэффициент показывает, во сколько раз ударное нагружение P_y превышает нагружение при статическом приложении нагрузки P (рис.2.5).

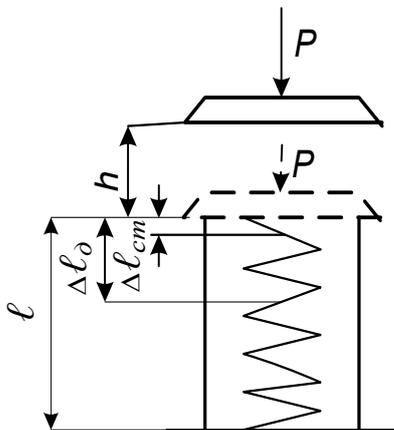


Рис. 2.5. Схема ударного эксплуатационного нагружения

Его значение находят по формуле

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

где h – расстояние между прикладываемой нагрузкой и деталью; $\Delta \ell_{ст}$, $\Delta \ell_{д}$ – величина деформации детали при статическом и динамическом нагружении.

Циклическим (колебательным) режимом динамического нагружения называется такое воздействие на элемент конструкции, когда изменение силовой нагрузки носит циклический (периодический) характер.

Циклический режим динамического нагружения характеризуется следующими параметрами (рис.2.6): циклом, амплитудой, размахом, частотой, коэффициентом асимметрии, средней амплитудой (средней нагрузкой).

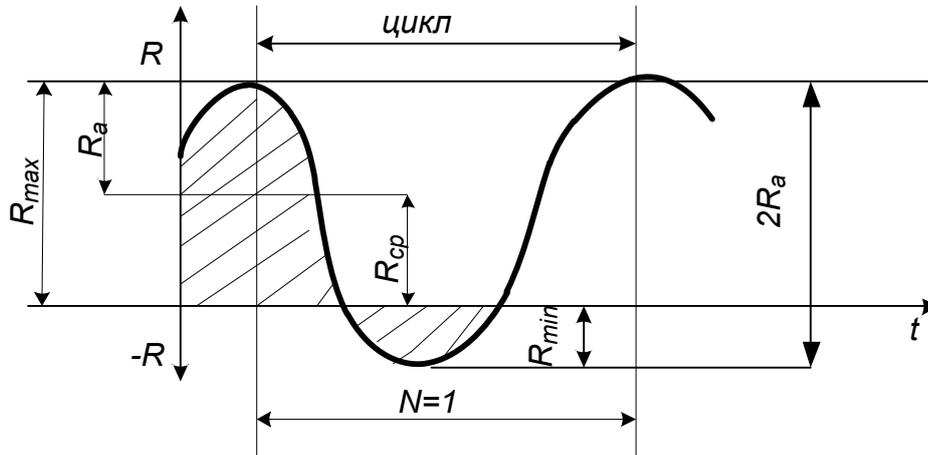


Рис. 2.6 Схема циклического эксплуатационного нагружения: R_{max} , R_{min} – максимальная и минимальная амплитуды нагрузки в цикле; R_{cp} – средняя амплитуда нагрузки в цикле; R_a – амплитуда цикла нагружения; N – общее число циклов нагружения.

Под *циклом нагружения* понимается совокупность переменных нагрузок за один период их изменения ($N=1$)

Амплитуда цикла R_a представляет собой полуразность наивысшего R_{max} и наименьшего R_{min} значений нагрузки

$$R_a = \frac{R_{max} - R_{min}}{2}. \quad (2.10)$$

Размахом цикла называют удвоенную амплитуду его колебаний, т.е.

$$2R_a = R_{max} + R_{min} \quad (2.11)$$

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

$$f_i = \frac{N_i}{t_i}. \quad (2.12)$$

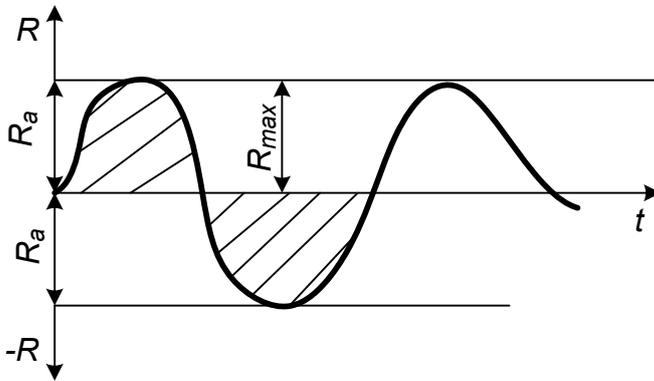
Под *коэффициентом асимметрии цикла* понимается отношение наименьшего значения нагрузки к наибольшему

$$\alpha_i = R_{min} / R_{max} \quad (2.13)$$

Средней нагрузкой цикла называется подсумма наибольшего и наименьшего значений нагрузки

$$R_{cp} = \frac{R_{max} + R_{min}}{2}. \quad (2.14)$$

При эксплуатации машин встречаются два вида циклического нагружения: симметричный и асимметричный. *Симметричным циклом* называют колебательный процесс, в котором амплитуды в положительном и отрицательном полупериодах равны друг другу (рис.2.7).



Параметры при таком виде циклического нагружения принимают следующие значения: $\alpha_i = 1$; $R_a = R_{max}$; $R_{cp} = 0$

Рис.2.7. Схема симметричного циклического нагружения

При *асимметричном цикле* амплитуды в полупериодах колебаний имеют разную величину (см. рис.2.6.).

Контрольные вопросы

1. Какие виды эксплуатационных нагружений воздействуют на детали машин?
2. Что понимается под силовым эксплуатационным нагружением?
3. Назовите режимы силового нагружения конструктивных элементов машин.
4. Какими параметрами характеризуется циклический (колебательный) режим динамического нагружения?
5. Объясните механизм термомеханического эксплуатационного нагружения.

ГЛАВА 3. ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИНЫ

Эксплуатационные нагружения, воздействуя на элементы конструкции машин, приводят к различным по виду повреждениям. В начальный период эксплуатации энергия сопротивления материала превышает экс-

платационное нагружение элемента, 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 свою работоспособность и не может выполнять своё функциональное назначение.

В зависимости от вида нагружения в деталях машин 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. 3.1.

Таблица 3.1.

№№ пп	Наименование эксплуатационного повреждения	Процентное распределение
1	Изнашивание под воздействием сил трения	45 - 50
2	Пластическое (остаточное) деформирование	25 - 30
3	Усталостное разрушение	15 - 20
4	Коррозионное разрушение и старение	5 - 10

3.1 Трение и изнашивание деталей

Основной причиной нарушения работоспособности машин являются изменения, возникающие в материалах деталей вследствие трения и изнашивания их поверхностей. Статистические данные показывают, что из-за изнашивания деталей под влиянием сил трения происходит до 50 ÷ 80% отказов машин, находящихся в эксплуатации.

3.1.1. Основные понятия о трении

Трением называют явление сопротивления относительному 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 при микросмещениях до перехода к относительному движению;

- *трение движения* – трение двух тел, находящихся в относительном движении;

По характеру относительного движения трение подразделяется на трение качения и трение скольжения.

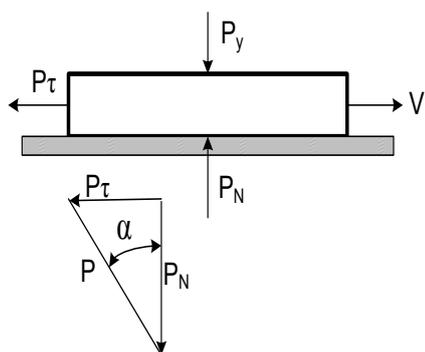
К *трению качения* относится трение движения твердых тел, при котором их скорости в точках качения одинаковы по величине и направлению.

Трением скольжения называется трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по величине и направлению или только по величине или только по направлению.

Основными качественными показателями, оценивающими процесс трения, являются:

- *сила трения* – сила сопротивления относительному перемещению двух тел трения;
- *коэффициент трения* – отношение силы трения к нормальной составляющей внешних сил, действующих на поверхности тела.

Коэффициент трения скольжения, величина которого зависит от шероховатости поверхностей, скорости их относительного перемещения, физико-механических свойств материалов, температуры в зоне трения, служит характеристикой сложности тех процессов, которые протекают в узле трения. В соответствии с классической теорией трения его значение определяется отношением силы трения к нормальной силе реакции: $f = P / P_N$ (рис.3.1)



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

Рис.3.1. Схема действия сил при трении скольжения

Современное представление о природе трения учитывает не только механическое, но и молекулярное взаимодействие поверхностей трения. В этом случае сила трения определяется из выражения

$$P_{\tau} = p F_k + \beta P_N, \quad (3.1)$$

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

В условиях сухого и граничного трения, как показано во многих работах, составляющая сила трения, обусловленная механическим взаимодействием (пластическим деформированием) значительно ниже составляющих, вызываемых молекулярным взаимодействием.

В сопряжениях, изнашивание которых происходит в условиях трения качения (рис.3.2), сила трения P_k зависит от нормальной составляющей внешних сил P_N , коэффициента трения f_k и радиуса цилиндра R .

$$P_k = f_k \cdot P_N / R . \quad (3.2)$$

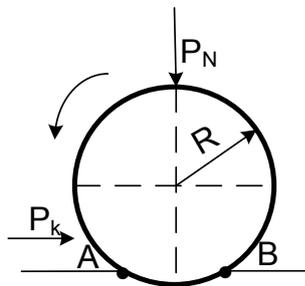


Рис.3.2. Схема контакта поверхностей деталей при трении качения

Наличие силы трения качения объясняется проскальзыванием контактирующих поверхностей. При взаимодействии материал цилиндра на участке А – В сжимается, а на плоскости вследствие упруго-пластических деформаций растягивается. В результате, цилиндр при

каждом обороте проходит путь больший, чем длина его окружности, поэтому наряду с чистым качением поверхностей происходит скольжение.

3.1.2. 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. Изнашивание является довольно сложным процессом, до настоящего времени недостаточно изученным.

Физическая сущность изнашивания заключается в том, что при относительно перемещении двух поверхностей в области их контакта возникают механические и молекулярные связи, сопровождающиеся тепловыми, окислительными и другими эффектами. Эти связи и их разрыв приводят, в

конечном счете, к разрушению микрообъемов поверхности и их удалению, т.е. к изнашиванию.

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

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

$$F_k = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (3.3.)$$

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

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

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

Существенное влияние на фактическую площадь контакта оказывает нормальная нагрузка, действующая на рабочую поверхность детали (рис.3.3).

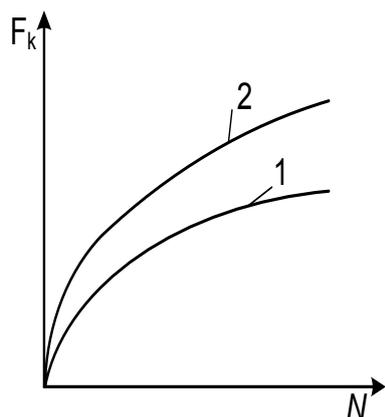


Рис.3.3. Зависимость фактической площади контакта F_k от нагрузки N для деталей : 1 – с твердостью HB_1 ; 2 – с твердостью HB_2 ($HB_1 > HB_2$)

В процессе изнашивания исходный (технологический) рельеф поверхности детали образуется в эксплуатационный (рис.3.4). При этом устанавливается та шероховатость поверхности, которая соответствует данному процессу разрушения поверхностных слоев в период нормального изнашивания.

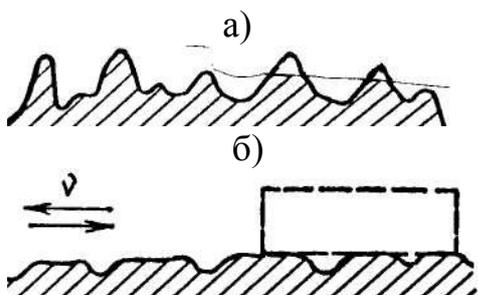


Рис. 3.4. Схема преобразования технологического рельефа поверхности (а) в эксплуатационный –(б).

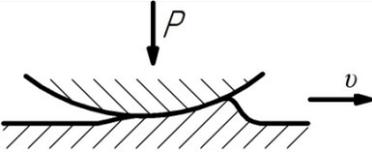
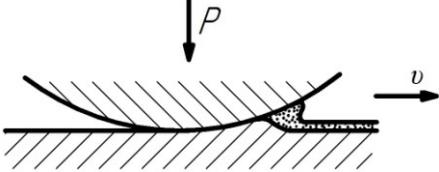
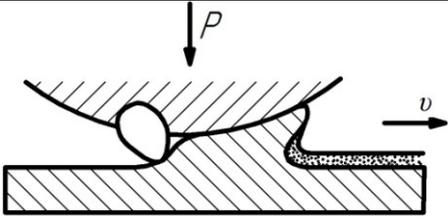
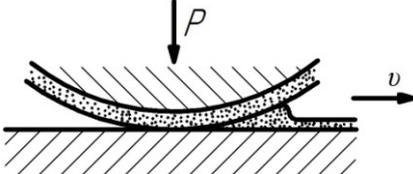
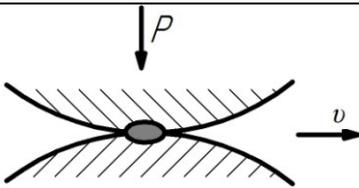
Основное влияние на процесс изнашивания оказывают постоянно возникающие и разрушающиеся фрикционные связи, имеющие молекулярно-механическую природу. В соответствии с ней при относительном перемещении рабочих поверхностей возникает два вида взаимодействия [0]: механическое и молекулярное.

Механическое взаимодействие возникает при контакте микронеровностей, перемещающихся друг относительно друга поверхностей, в результате чего происходит их механическое сцепление. В зависимости от характера такого взаимодействия наблюдается упругая или пластическая деформация (оттеснение материала), а также микрорезание микровыступами более твердой поверхности менее твердой.

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

Таким образом, в зависимости от характера взаимодействия материалов, соотношения механической и молекулярной составляющих трения различают пять основных видов деформирования и разрушения деталей при изнашивании (табл. 3.1).

Таблица 3.1

№ п/п	Схема взаимодействия материалов	Характер разрушения
1		Упругое отеснение материала
2		Пластическое отеснение материала
3		Микрорезание материала
4		Разрушение окисных пленок
5		Разрушение основного материала

3.1.3. Основные и сопутствующие процессы изнашивания

В основе фундаментального изучения изнашивания деталей машин лежит положение о ведущих и сопутствующих процессах разрушения. Основным процессом, возникающим при трении материалов и вызывающим износ деталей, является упругопластическая деформация, возникающая в результате взаимодействия микронеровностей поверхностей. Однако этот процесс сопровождается целой гаммой сопутствующих процессов (физических, химических и механических), протекающих в поверхностных сло-

ях 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.

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

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

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

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

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

Микрорезание возникает в том случае, когда твердость абразивных частиц значительно выше твердости металла. В этом случае износостойкость материала ϵ пропорциональна ее твердости H (рис.3.5).

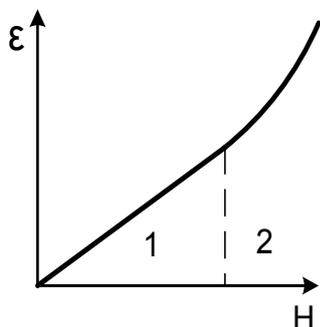


Рис. 3.5. Зависимость износостойкости материала ϵ от твердости H

С уменьшением разницы в значениях твердости материала H_m и абразива H_a линейная зависимость износостойкости (начиная с их соотношения $H_m \geq 0,6 H_a$) преобразуется в степенную. Это связано с механизмом разрушения материала. Деформация металла на поверхности трения (участок 1) постепенно преобразуется в коррозионно-механическое истирание (участок 2).

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 деталей и удельными нагрузками, превышающими предел текучести, при отсутствии разделяющего слоя смазки и защитной окисной пленки в местах контакта возникает недопустимый вид изнашивания – *схватывание I рода*. Он сопровождается незначительным повышением температуры и приводит к интенсивному пластическому деформированию поверхностей деталей. 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 не допустим.

При высоких скоростях относительного скольжения поверхностей и повышенных давлениях с предшествующей десорбцией смазки развивается процесс *схватывания II рода*. При этом виде изнашивания возникают местные металлические связи, сопровождаемые деформациями, разрушениями в виде трещин, выделением большого количества тепла. При этом

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

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

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

3.2. Пластическая деформация

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

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

Пластическая деформация представляет собой необратимое изменение формы и размеров детали после снятия нагрузки. Такая деформация возникает с увеличением нагрузки на материал конструктивного элемента, когда в металле появляются сдвиги одних микрообъемов относительно

других. Эти сдвиги необратимы и если снять нагрузку, тело в прежние размеры не вернется.

Возникает некоторое формоизменение, которое носит название *пластического* или *остаточного деформирования*

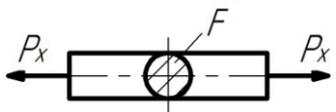
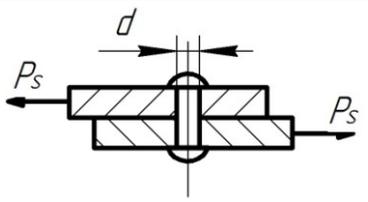
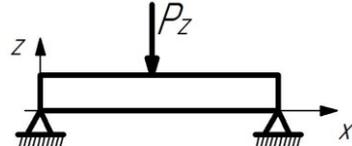
При деформировании в материале детали возникают внутренние силы, противодействующие этому процессу. Способность материала детали выдерживать внешние силовые нагрузки без разрушения называют *прочностью*, а ее количественной мерой служит *напряжение прочности*. При этом различают:

- нормальное напряжение прочности $\sigma_H = P/F$;
- касательное напряжение прочности $\tau_H = P_S/F_S$.

Нормальные напряжения противодействуют отрыву отдельных частей материала детали, а касательные - сдвигу отдельных частей друг от друга.

По способу воздействия на конструктивные элементы различают следующие простейшие виды эксплуатационных нагружений, вызывающих деформации: растяжение (сжатие), сдвиг, изгиб, кручение. В табл.3.2. представлены схемы таких нагружений, их параметры, характеристики сопротивляемости элементов деформациям и расчетные формулы определения возникающих напряжений.

Таблица 3.2

Вид деформации	Схема нагружения	Характеристика сопротивляемости элемента	Параметр нагружения	Напряжение нагружения
Растяжение (сжатие)		Площадь поперечного сечения F	Осевая сила P_x	$\sigma_H = \frac{P_x}{F}$
Сдвиг (срез)		Площадь сечения F_S в направлении действия силы P_S	Поперечная сила P_S	$\tau_H = \frac{P_S}{F_S}$
Изгиб		Момент сопротивления сечения изгибу W_X	Изгибающий момент M_X	$\sigma_H = \frac{M_X}{W_X}$

Кручение		Момент сопротивления сечения кручению W_p	Крутящий момент M_p	$\sigma_H = \frac{M_p}{W_p}$
----------	---	---	-----------------------	------------------------------

При эксплуатации машин подобные виды нагружений в чистом виде встречаются редко. Чаще всего материал конструктивного элемента подвергается сложному нагружению. Например, изгибу с растяжением, изгибу с кручением, изгибу со сжатием и т.д. В этих случаях для определения суммарного напряжения 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

$$\sigma_H = \sum_{i=1}^K \sigma_{H_i}, \quad (3.6)$$

где σ_{H_i} - напряжение от действия i -ой нагрузки; n - число видов нагружений.

Изгибу и кручению подвержены валы, торсионы, пружины, рессоры и другие конструктивные элементы, работающие в условиях высоких напряжений материала. У такой сложной детали, как блок цилиндров двигателя, остаточные деформации приводят к изменению положения осей посадочных отверстий под гильзы, под вкладыши коренных подшипников коленчатого вала, обработанных поверхностей относительно технологических баз, что существенно снижает долговечность двигателя в целом. Для коленчатого вала характерны такие деформации, как скручивание вала с нарушением расположения кривошипов, а также изгиб, в результате которого возникает торцевое биение фланца маховика.

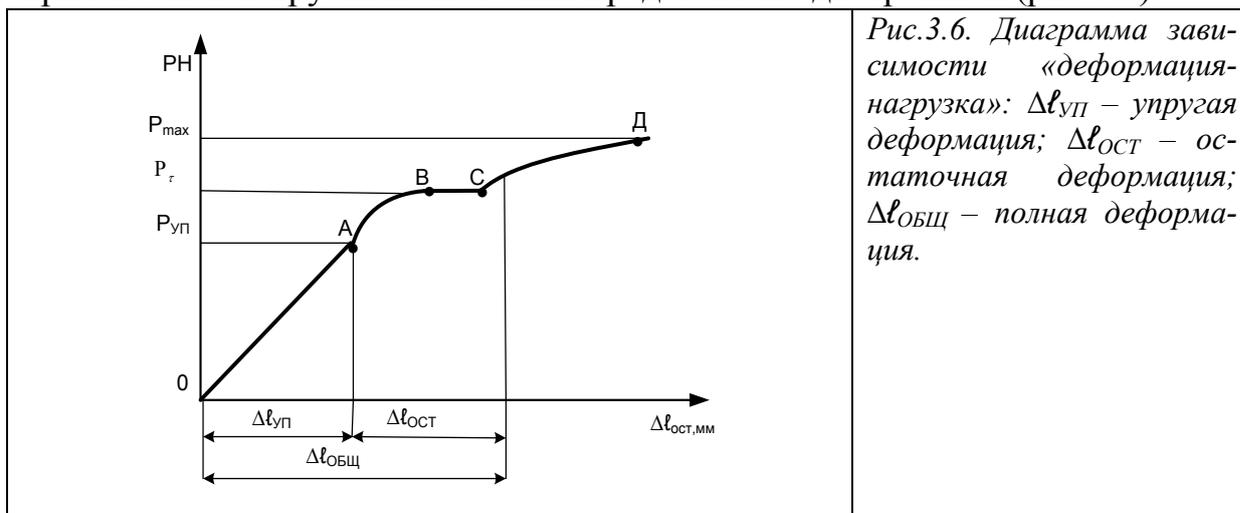
Сдвигу (срезу) подвергаются детали, работающие в условиях значительных нагрузок и при отсутствии относительного перемещения контактирующих поверхностей. Такие виды разрушения возникают в шпоночных, шлицевых и резьбовых соединениях, упорах, штифтах и других деталях машин.

Пластические деформации могут возникать также в результате релаксации* внутренних напряжений в деталях, которые вызывают их коробление. Такие повреждения характерны для блоков и головок цилиндров

двигателя, корпусных деталей коробок передач, задних мостов, рам кузовов и других деталей автомобилей.

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

Графически изменение пластической деформации в зависимости от прилагаемой нагрузки может быть представлено диаграммой (рис.3.6).



При приложении нагрузки до определенного значения (точка А) материал детали деформируется, т.е. если снять нагрузку, деформация исчезает. На участке ОА деформация $\Delta l_{уп}$ прямо пропорциональна нагрузке P . Нагрузка $P_{уп}$, соответствующая точке А, будет соответствовать пределу упругости.

Предел упругости – это максимальное напряжение, до которого материал детали деформируется упруго:

$$\sigma_{уп} = P_{уп} / F, \quad (3.7)$$

где F – площадь поперечного сечения элемента, m^2 .

Дальнейшее повышение нагрузки приводит к тому, что в металле появляются единичные сдвиги, т.е. возникает пластическая деформация. Деформация происходит при постоянной нагрузке (участок ВС). Нагрузка P_T , при которой начинается пластическая деформация, соответствует пределу текучести.

Предел текучести – это минимальное напряжение, при котором возникает пластическая деформация:

$$\sigma_T = P_T / F, \quad (3.8)$$

При дальнейшем возрастании нагрузки деформация Δl увеличивается и в конечном счете при достижении нагрузки значения, соответствующей пределу текучести P_{max} , происходит отделение одной части детали от другой.

Предел прочности – это напряжение, соответствующей максимальной нагрузке, предшествующей разрушению:

$$\sigma_B = P_{max} / F, \quad (3.9)$$

При нагрузке P_{max} деформация локализуется, т.е. сосредотачивается в наиболее слабом сечении детали и развивается катастрофически быстро.

3.3. Усталостное разрушение

Усталостное разрушение происходит в результате постепенного изменения физико-механических свойств в металлических деталях машин из-за многократного воздействия повторно-переменных 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 $\sigma_{уп}$.

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

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

При приложении внешних нагрузок происходит перемещение этих дислокаций путем скольжения. Для их продвижения, а следовательно и развития пластической деформации больших нагрузок не требуется. При этом общее число дислокаций увеличивается, что приводит к увеличению

сопротивления скольжения из-за деформационного упрочнения материала (наклепа). Именно в местах скольжения дислокаций перед препятствиями (посторонними внедрениями) зарождаются *микроскопические трещины*, вызываемые разрывом связей в кристаллической структуре металла. Локальные напряжения в области скольжения дислокаций в этот период эксплуатации конструктивных элементов превысили предел текучести материала σ_T .

Таким образом, процесс усталостного разрушения можно подразделить на 3 стадии:

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

Таким образом, трещины начинают развиваться во втором, достаточно продолжительном периоде. 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 внутренних напряжений, вызываемых силовыми и температурными воздействиями на материал детали в процессе ее обработки. Внутренние остаточные напряжения, которые сохраняются в детали длительное время, интегрируясь с напряжениями, возникающими в результате действия внешних эксплуатационных нагрузок, могут их усиливать или ослаблять.

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.3.7. приведены типичные эпюры внутренних остаточных напряжений I рода, когда остаточные напряжения максимальны непосредственно у поверхностного слоя. Как следует из эпюр напряжения, в поверхностном слое могут быть как сжимающими (а), так и растягивающими (б). Наиболее неблагоприятное воздействие оказывают растягивающие напряжения, которые приводят к существенному снижению усталостной прочности и износостойкости.

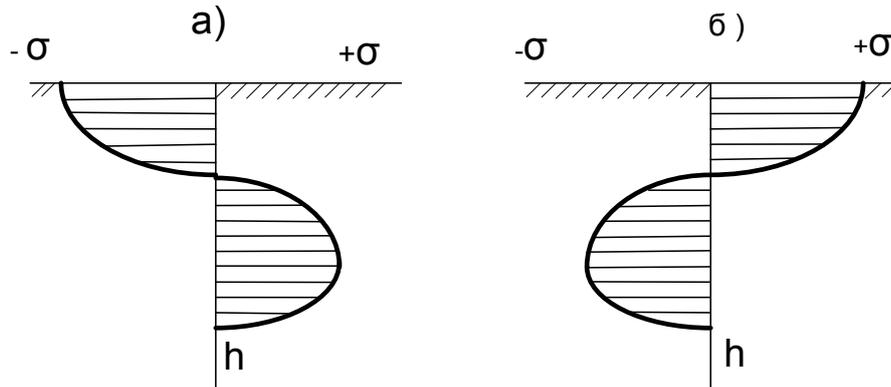


Рис.3.7. Типичные эпюры остаточных напряжений I рода в поверхностном слое

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 графической зависимостью между числом циклов N и величиной напряжения σ является кривая выносливости (кривая Вёлера), которую получают с помощью испытаний (рис.3.8). 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

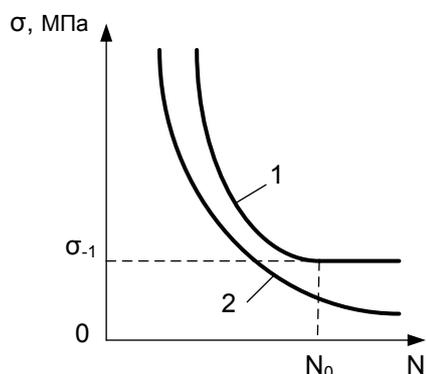


Рис.3.8. Кривая выносливости: 1 – для сталей, 2 – цветных металлов

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 равным $N_0 = 10^8$.

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

$$N_0 = k (\sigma - \sigma_{-1})^{-m}, \quad (3.10)$$

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

На предел выносливости оказывают влияние главным образом 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, при котором максимальное R_{max} и минимальное R_{min} значения нагрузок цикла равны между собой, а коэффициент асимметрии $\alpha_i = R_{min} / R_{max} = 1$ (см. рис. 2.5).

Сопrotивление конструктивных элементов усталостному разрушению зависит и от скорости (частоты) приложения переменной нагрузки. При повышенных частотах предел выносливости снижается, что объясня-

предел выносливости σ_{-1} . Практика образцов из сталей показывает, что если образец выдерживает не разрушаясь 10^7 циклов, то он не разрушится и в дальнейшем. Это число циклов называют *базовым N_0* , т.е. достаточным при усталостных испытаниях.

Не все металлы имеют участок кривой выносливости, параллельной оси абсцисс. Для цветных металлов и

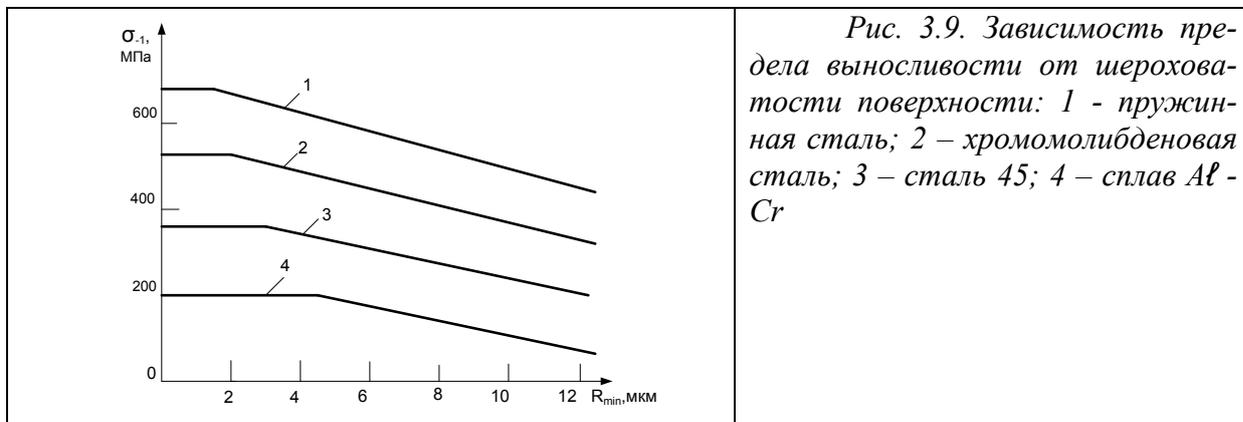
ется недостаточной эффективностью теплоотвода (охлаждения), при низких частотах он увеличивается.

Кроме циклических воздействий на предел выносливости существенное влияние оказывают форма и размер детали, виды и режимы ее обработки, физико-механические свойства материала. 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.

Снижает предел выносливости детали наличие различных концентраторов внутренних напряжений в местах резкого изменения ее формы (отверстия, канавки, галтели и другие конструктивные элементы).

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. На рис. 3.9. показана зависимость предела выносливости различных материалов от шероховатости.

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 подвергаются закалке ТВЧ, химико-термической обработке, поверхностному пластическому деформированию. Эти виды обработки создают в поверхностном слое детали остаточные сжимающие напряжения, которые затрудняют зарождение и развитие трещин, тем самым предел выносливости.



На характер образования в материале усталостных микротрещин оказывают влияние внешние факторы, действующие на элемент конструкции одновременно с силовым циклическим нагружением. Наиболее существенным из этих факторов являются *температура и коррозионная среда*.

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

Как видно из рис. 3.10 после достижения определенной температуры характеристики прочности материала, в том числе и предел выносливости с дальнейшим повышением температуры снижается.

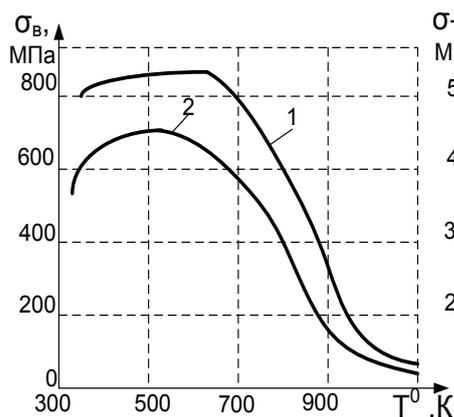


Рис. 3.10 Зависимость напряжений прочности σ_B от температуры: 1 – углеродистая сталь 45; 2 – легированная сталь 40Х.

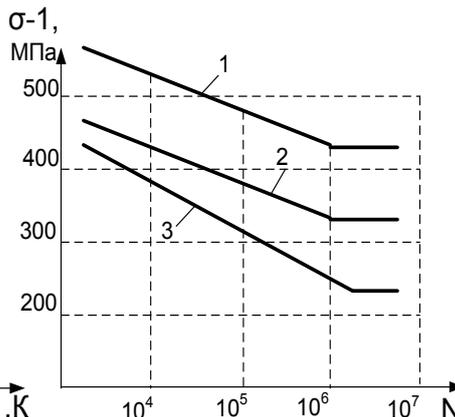


Рис. 3.11. Кривая выносливости образцов из стали 20Х13 с коррозионными повреждениями: N – число циклов нагружения; 1 – новые; 2 – после эксплуатации на воздухе; 3 – после испытаний в морской воде.

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

Процесс разрушения металла при одновременном воздействии на него многократных циклических нагрузок и химически агрессивных сред на-

зывают *коррозионной усталостью*. Кислород и другие активные газы при взаимодействии с металлом увеличивают скорость распространения трещин и, соответственно, снижают предел выносливости (рис. 3.11).

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

3.4. Коррозионное разрушение деталей машин

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

Коррозия металла является одним из наиболее опасных видов разрушения конструктивных элементов машин. Ежегодно прямые потери от коррозии составляют 10% всего выплавляемого 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. Потери металла от коррозии кузовов легковых автомобилей за срок службы составляет 35-40%, а кузовов автобусов за 6 – 7 лет эксплуатации – 55-60%.

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

3.4.1. Классификация коррозионных процессов

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В подавляющем большинстве случаев коррозионное разрушение деталей машин протекает по электрохимическому принципу. На поверхности конструктивного элемента образуется множество микрогальванических пар, взаимодействие которых и приводит к разрушению металла. На отдельных участках поверхности детали образуются катодные участки, на которых идет восстановление окислителей, находящихся в растворе элек-

тролита. На остальной поверхности детали чаще всего на неровностях, локализуются анодные участки, на которых происходит растворение металла.

Наряду с образованием гальванических микропар на поверхности одной детали возникают микропары между сопряженными деталями, изготовленными из разных металлов. Анодом в такой микропаре становится металл, имеющий более отрицательный потенциал.

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 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

$$I = \frac{U_c - U_m}{R}, \quad (3.11)$$

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

Разность потенциалов на границе, например, 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.

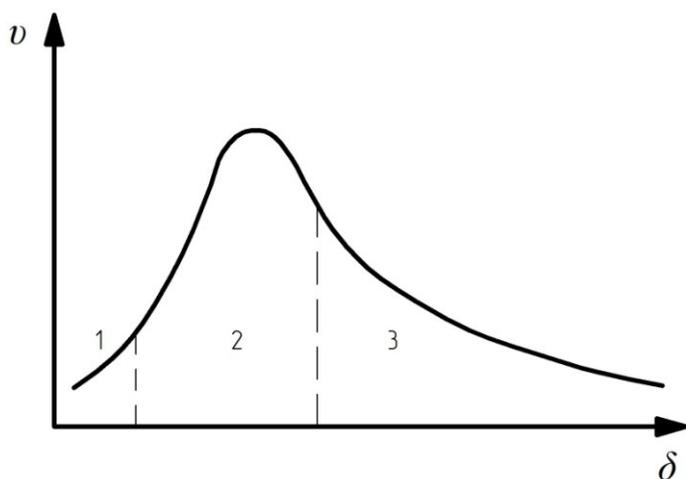
$$U_c - U_m = 0.$$

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 от 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.



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

В зависимости от толщины пленки влаги на поверхности металла атмосферную коррозию можно условно подразделить на сухую, влажную и мокрую (рис.3.12).

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 хи-

мической коррозии. Такая коррозия вследствие слабой интенсивности процесса оказывает минимальное влияние на долговечность деталей машин.

Атмосферную коррозию, протекающую при относительной влажности менее 98% под конденсационными пленками влаги (до 1мкм) называют *влажной*. В условиях такой коррозии процесс взаимодействия металла со средой приобретает электрохимический характер. При этом скорость коррозионного разрушения поверхности металла резко возрастает с увеличением толщины пленки влаги δ (см. рис. 3.12).

Атмосферную коррозию, протекающую при относительной влажности выше 98 % в условиях капельной конденсации или прямого попадания атмосферных осадков на поверхность металла с образованием пленок вла-

ги, 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 скорость коррозии еще меньше.

В реальных условиях эксплуатации машин влажность, температура, агрессивность окружающей среды может 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 окалина, который усиливается по мере роста температуры нагрева. При циклических изменениях температуры в окалине возникают внутренние напряжения, которые обусловлены большой разницей коэффициентов линейного расширения (у окалина 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, смазочные масла) зависит от содержания в них серы, агрессивных продуктов окисления смазочных масел, хлора и других активных элементов противозадирных 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 оче-

редь приводит к снижению мощности двигателя, увеличению расхода топлива и масла.

Биологическая коррозия представляет собой процесс разрушения поверхностей металлов продуктами жизнедеятельности различных микроорганизмов (бактерий, грибков, 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 (при оптимальной влажности воздуха $75 \div 95\%$) 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 смазывании контактов электролитами процесс коррозионного разрушения интенсифицируется. При этом преимущественное коррозионное разрушение происходит на поверхности детали с более электроотрицательным потенциалом, являющегося в данных условиях анодным. 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. Причиной щелевой коррозии является образование градиента концентраций агрессивного компонента внутри и вне щели. Это ведет к образованию коррозионной пары и ускоренному растворению анодного участка.

Щелевая коррозия возникает и в местах неплотного контакта металлической поверхности с неметаллической. Такому виду разрушения под-

вержены клапанные механизмы, калиброванные дозирующие устройства, гильзы цилиндров под резиновыми уплотнительными манжетами и др.

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

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

Фреттинг-коррозия развивается в конструктивных элементах, работающих в условиях пресовых посадок; в шлицевых, шпоночных, винтовых, болтовых и заклепочных соединениях; в подшипниках качения, контактных поверхностях рессор и пружин, кулачковых и шарнирных механизмах и т.д.

Внешним проявлением фреттинг-коррозии являются натирные поверхности, налипание металла, вырывы или раковины, заполненные порошкообразными продуктами коррозии, поверхностные микротрещины. В случае больших давлений и высокой частоты колебаний появляются глубокие выкрашивания и волнообразность поверхности. Фреттинг-коррозия может привести к ослаблению натяга контактирующих поверхностей или, наоборот, к их заклиниванию, если продукты коррозионного разрушения не имеют выхода из зоны контакта.

По характеру разрушения в зависимости от степени охвата поверхности детали коррозия подразделяется на следующие виды (рис. 3.13.):

а)

б)

в)

г)

д)

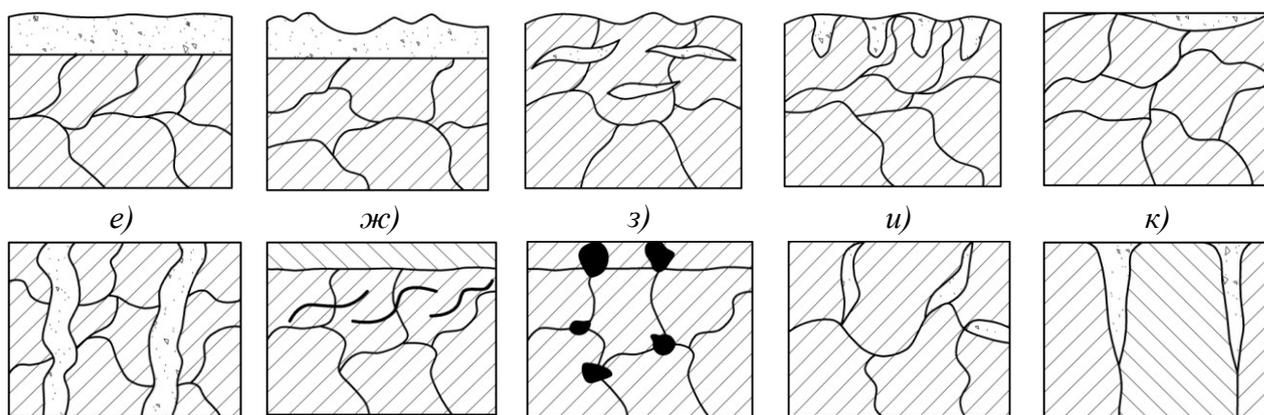


Рис.3.13. Основные виды коррозии металлов: а – равномерная; б – неравномерная; в – подповерхностная; г – точечная; д – отдельными пятнами; е – сквозная; ж - нитевидная; з – структурная; и – межкристаллитная; к – ножжевая.

Сплошная коррозия охватывает всю поверхность детали и в зависимости от характера распределения повреждений на поверхности подразделяется на следующие виды:

- равномерную, развивающуюся с одинаковой скоростью по всей поверхности металла;
- неравномерную, протекающую на разных участках поверхности с различной скоростью.

Местная коррозия охватывает отдельные участки поверхности металла, вызывая локальные повреждения деталей машин. В зависимости от формы разрушения местная коррозия подразделяется на следующие виды:

- подповерхностную, начинающуюся с поверхности, но преимущественно распространяющуюся под ней таким образом, что разрушение и продукты коррозии оказываются сосредоточенными на некоторых участках внутри металла, вызывая его вспучивание и расслоение;
- точечную – коррозию в виде отдельных точечных поражений, диаметр которых меньше глубины проникновения;
- коррозию в виде отдельных пятен, диаметры которых значительно превышают глубину проникновения;
- сквозную – коррозию, вызывающую разрушение металла насквозь.

По виду распространения коррозия подразделяется на:

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

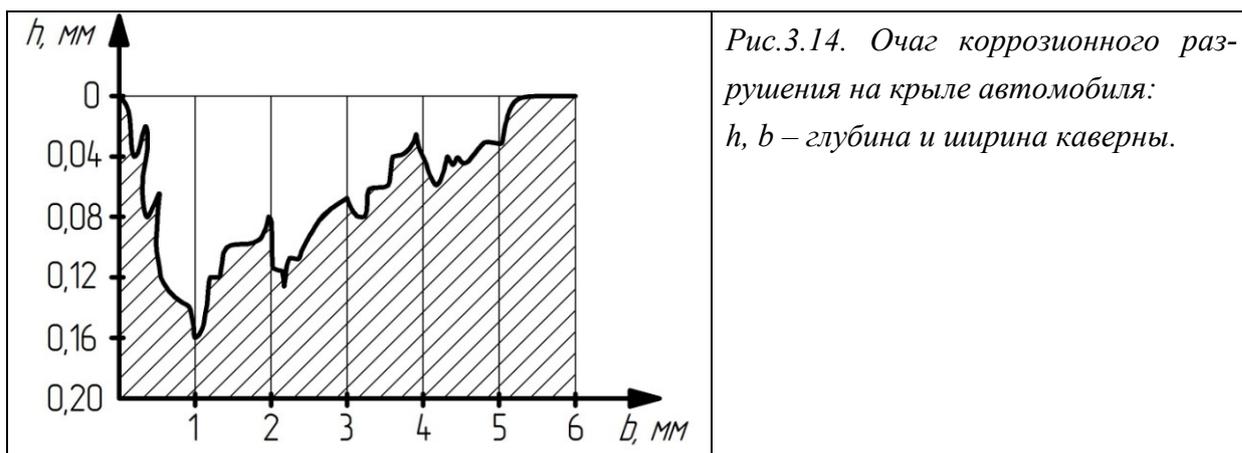
- структурную – коррозию, связанную со структурной неоднородностью металла;
- межкристаллитную – коррозию, которая распространяется по границам кристаллов (зерен) металла;
- ножевую – коррозию, распространяющуюся на участках сплавления (сварки) металлов деталей, работающих в агрессивных средах.

Любое коррозионное повреждение материала конструктивного элемента снижает его долговечность. Наибольшую опасность для функционирования машины представляет местная (локальная) коррозия, так как при сравнительно небольшой потере металла все прочностные характеристики деталей снижаются. Детали, 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 эффективным показателем оценки коррозии является глубина ее проникновения в материал детали. В целом ряде исследований приведены достаточно убедительные данные о влиянии глубины коррозионных каверн на существенное (до 50%) снижение предела усталости, вполне сопоставимой со снижением усталостной выносливости от надрезов и других концентраторов напряжения. На рис. 3.14 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.



3.4.2. Факторы, влияющие на развитие коррозионных процессов

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, причинами которой являются наличие металлических и неметаллических электропроводных макровключений, контакт разнородных материалов, неоднородность защитных пленок и т.п.

К *конструктивным факторам* относятся: конструкция деталей и сопряжений (наличие застойных зон, зазоров, щелей); контакт металлов,

имеющих различные электродные потенциалы; характер соединения элементов конструкции (сварное, резьбовое, шлицевое, заклепочное и др.); концентрация напряжений; характер нагружения.

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

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

Из технологических факторов наиболее существенное влияние на развитие коррозионного процесса оказывают: включения в металл примесей; технологические особенности изготовления полуфабрикатов (литье, обработка давлением и др.); обработка поверхностей (механическая, химико-термическая, электрохимическая и т.п.); внутренние дефекты в металле, не выявленные в процессе производства; технологические особенности соединения элементов конструкции (дефекты сварки, пайки и др.).

Большое влияние на развитие коррозионных процессов оказывают *эксплуатационные факторы*. К ним прежде всего относятся: продолжительность эксплуатации, температура и диапазон ее изменения, состав атмосферы, характер загрязнения поверхностей, внешние нагрузки, наличие стимуляторов (ингибиторов) коррозии, солнечная радиация.

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

3.4.3 Методы защиты от коррозии

Методы защиты деталей от коррозии направлены на устранение или снижение активности факторов, способствующих развитию коррозионных процессов. Условно их можно подразделить на три группы:

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

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

В настоящее время при изготовлении деталей машин широко используют защитные покрытия, наносимые на поверхности: погружением в ванну с расплавленным металлом (оцинкование, лужение, свинцевание); химико-термической обработкой (цементация, азотирование, цианирование); гальваническим способом (твердое хромирование, блестящее оцинкование, кадмирование, многослойные покрытия медь-силникель-хром и др.); диффузией в верхний слой металла (алитирование, диффузионное хромирование); химической обработкой 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 важное значение и требует выполнения ряда технологических операций. Например, получение надежного коррозионностойкого ЛКП кузовов и кабин автомобилей, 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*, которое служит для образования связующего слоя между подложкой и последующими слоями покрытия;
- *шпатлевание*, предназначенное для выравнивания мелких дефектов на загрунтованных поверхностях;

- *окрашивание* на завершающей стадии покрытия.

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

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

К методам защиты машин от коррозионного воздействия среды относятся, прежде всего, герметизация сопряжений; максимальное сокращение застойных зон, щелей, зазоров; очистка атмосферного воздуха от загрязнений; поддержание оптимальных температурных режимов; введение качественных противокоррозионных присадок в состав смазочных материалов. При эксплуатации машин важное значение для снижения интенсивности развития коррозионных процессов имеет своевременное восстановление поврежденных защитных покрытий.

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.

3.5. Старение материалов

Старением материалов называются процессы изменения их физико-механических свойств во времени в условиях длительного хранения при эксплуатации. 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 (закалке, наклепке 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 более стабильное и 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 компонента сплава (присадка 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 приводит к упрочнению сплавов, увеличению их твердости, повышению сопротивления пластической деформации и коррозионному разрушению. Но 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 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 резко уменьшается время на достижение стабильного равновесия. Например, отпуск металла при температуре 100°C осуществляется в течение одного часа, а при 20°C процесс достижения происходит в течение 10 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 температуре 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 масла, ухудшающие 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 масла при его старении приводит к тому, что оно перестает выполнять заданные функции, тем самым интенсифицируя процессы трения и изнашивания.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные причины, вызывающие отказы и повреждения машин.
2. Приведите основные виды трения рабочих поверхностей машин.
3. Какими количественными показателями оценивается процесс трения?
4. Раскройте физическую сущность изнашивания.
5. Какие виды деформирования и разрушения возникают при изнашивании?
6. Приведите основные и сопутствующие процессы изнашивания.
7. Раскройте сущность процесса пластического деформирования материала деталей.
8. Приведите основные виды деформаций в зависимости от прилагаемых нагрузок.
9. Какие физические процессы приводят к усталостному разрушению деталей?
10. Какими характеристиками оценивается долговечность деталей, работающих в условиях переменных нагрузок?
11. Приведите основные факторы, оказывающие влияние на выносливость металла.
12. Что понимается под коррозионным разрушением?
13. Объясните сущность химических и электрохимических процессов коррозии.
14. Какие виды коррозионного разрушения возникают в деталях машин?
15. Какие способы защиты деталей от коррозионного разрушения используются в современном машиностроении?

Глава 4. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ

4.1. Классификация видов изнашивания

В зависимости от факторов, определяющих тот или иной процесс разрушения поверхности детали при трении, все виды изнашивания раз-

делены на три основные группы: механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое (рис. 4.1) .



Рис. 4.1 Виды изнашивания деталей

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

Абразивное изнашивание – наиболее распространенный вид изнашивания. Вызывается наличием на поверхности трения абразивных частиц, попавших с воздухом, топливом и маслом (вследствие недостаточной фильтрации), а также образовавшихся при разрушении микрообъемов трущихся поверхностей. Абразивный износ возможен и тогда, когда твердые составляющие одного из сопряженных тел оказывают режущее или царапающее воздействие на другое сопряженное тело. Этому виду изнашивания подвержены практически все детали транспортных и других машин.

Интенсивность абразивного изнашивания зависит от размеров, формы, твердости и свойств абразивных частиц, а также от физико-механических характеристик материалов сопряжений, удельного давления на поверхность трения, скорости относительного скольжения, характера

смазки. В результате абразивного изнашивания на рабочих поверхностях деталей образуются риски и царапины, возникает упруго - пластическое деформирование и 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.4.2.). Проявление этих форм зависит от соотношения твердости абразивных частиц и рабочих поверхностей деталей.

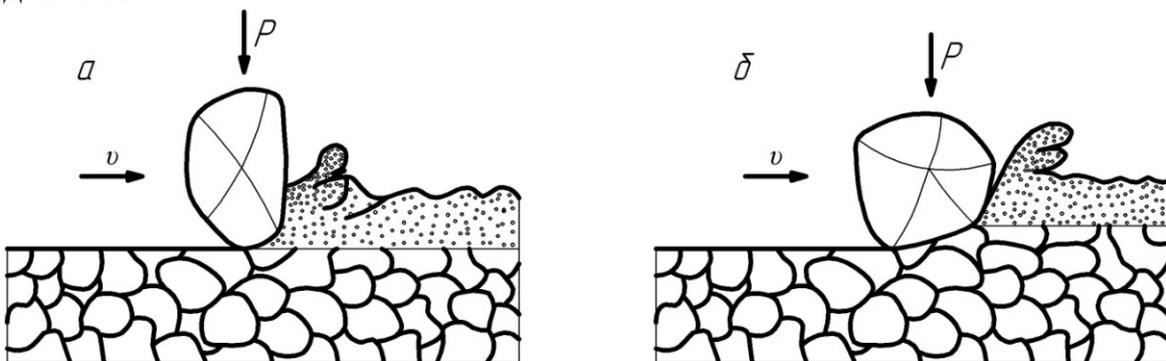


Рис.4.2. Формы абразивного изнашивания: а – механохимическая; б – механическая (микрорезание).

Если твердость абразивной частицы H_a и твердость основного материала детали H_m соизмеримы, наблюдается механохимическая форма изнашивания. При соотношении $H_a/H_m > 1,7$ возникает механическая форма повреждаемости (микрорезание).

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

Разновидностью абразивного износа являются *гидроабразивное* и *газоабразивное изнашивание*. Такие виды изнашивание возникают в результате действия твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе и перемещающихся относительно изнашивающегося тела. Гидроабразивному виду

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

- энергии удара частиц в потоках газа или жидкости;
- 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

$$J = k \cdot v^m, \quad (4.1)$$

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.4.3).

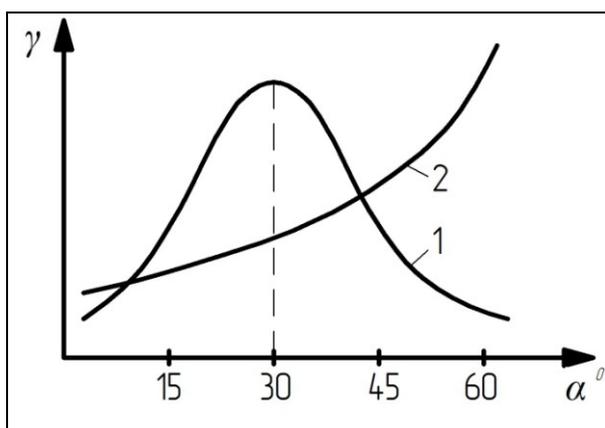


Рис.4.3. Зависимость интенсивности гидро- и газоабразивного изнашивания γ от угла атаки α абразивных частиц: 1 – пластичные материалы; 2 – хрупкие материалы

С ростом угла атаки до 30° интенсивность гидро- и газоабразивного изнашивания для материалов с невысокой прочностью увеличивается. С дальнейшим увеличением угла атаки наблюдается эффект упрочнения поверхности, аналогичный наклепу, поэтому интенсивность изнашивания снижается. Для хрупких материалов, обладающих высокой прочностью

поверхности, интенсивность изнашивания резко возрастает начиная с угла атаки $50-60^{\circ}$, так как при меньших углах материал хорошо выдерживает воздействие абразивных частиц.

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

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

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

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

Усталостное изнашивание (контактная усталость) является следствием циклического воздействия на микровыступы 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 усталост-

стное 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 износа.

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

Контактная выносливость, под которой понимается способность материала, сопротивляться контактной усталости, зависит в основном от твердости и шероховатости поверхности детали. С повышением твердости повышается сопротивляемость усталостному изнашиванию, которую оценивают наработкой детали до начала отрыва частиц металла с поверхности и максимальным контактным напряжением, при котором не начинается образование питтинговых разрушений при заданном числе циклов нагружения. Нарботка до начала усталостного выкрашивания возрастает с увеличением вязкости смазочного материала μ и твердости рабочей поверхности H , а уменьшается с ростом эксплуатационного нагружения P (рис.4.4).

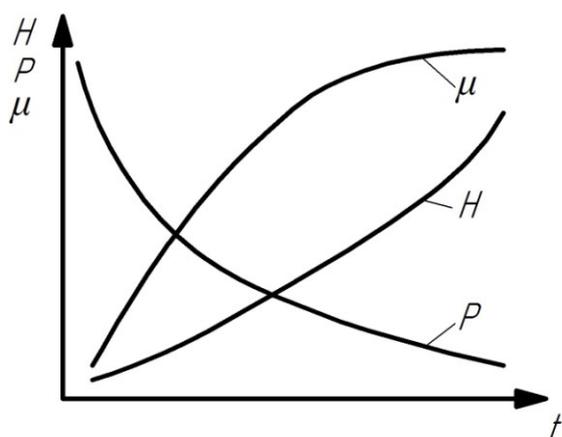


Рис. 4.4. Зависимость наработки до возникновения усталостного выкрашивания от твердости металла H , эксплуатационного нагружения P и вязкости смазочного материала μ .

Усталостное изнашивание чаще всего проявляется в виде местного выкрашивания на поверхностях сопряженных деталей, перекатывающихся под нагрузкой с проскальзыванием или без него. В таких условиях работают, например, элементы подшипников качения, зубчатые колеса, кулачки и толкатели, вкладыши подшипники коленчатого вала и другие детали.

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

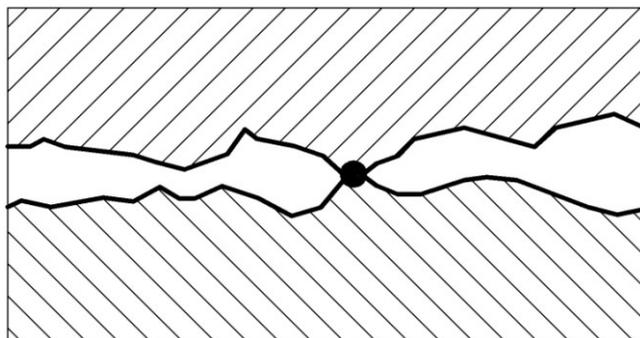
Молекулярно-механическое изнашивание (изнашивание при схватывании) возникает в результате одновременного механического и атомно-молекулярного взаимодействия материалов контактирующих поверхностей деталей.

Адгезионное изнашивание связано с возникновением в локальных зонах контакта поверхностей интенсивного молекулярного (адгезионного) взаимодействия, силы которого превосходят прочность связей материала поверхностных слоев с основным материалом. При трении металлических пар происходит схватывание (схватывание II рода) 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 происходят тогда, когда между сопряженными деталями исчезает разделяющая их смазка, а также окисные пленки. Под действием эксплуатационных нагрузок рабочие поверхности деталей сближаются на расстояние межатомного взаимодействия.

По интенсивности развития различают следующие степени молекулярно-механического изнашивания:

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

Под действием высоких эксплуатационных нагрузок рабочие поверхности деталей сближаются на расстояние межатомного взаимодействия, в результате чего образуются металлические связи (рис.4.5).



	При перемещении поверхностей относительно друг друга эти контактирующие участки разрушаются и происходит перенос частиц металла с одной, менее прочной поверхности на другую, более прочную.
--	--

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, т.н. сервоитной 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 сервоитная 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, соответствующему жидкостному трению, при котором усталостное изнашивание отсутствует.

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

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

Коррозионно-механическое изнашивание возникает при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой. 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 удаляется при трении. Затем процесс повторяется, и в него вступают новые, нижние слои металла. Продукты износа состоят из окислов основного металла. 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. В отличие от механического изнашивания при фреттинге такой вид изнашивания возникает при наличии в зоне трения окисляющей окружающей среды. На соприкасающихся поверхностях вна-

чале возникают окисные пленки, которые при относительных колебательных перемещениях разрушаются.

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

Процесс повреждения деталей при фреттинг – коррозии является достаточно сложным и включает 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 ювентильных 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 действием кислорода воздуха и влаги. Изнашивание связано с образованием, разрушением и удалением из зоны контакта окисных пленок. Процесс изнашивания в этот период стабилизируется, скорость изнашивания поверхностных слоев по сравнению со скоростью первого периода невелика.

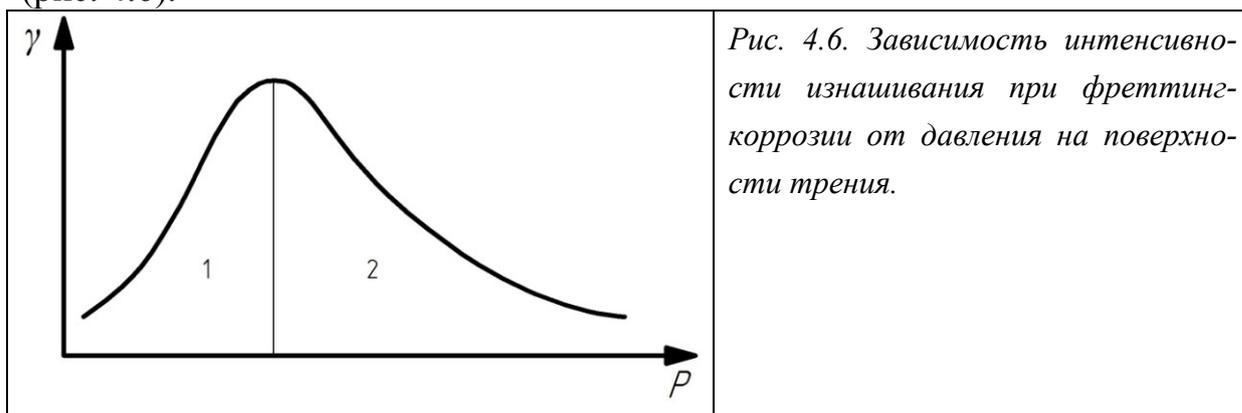
Третий период фреттинг - коррозии связан с разрушением поверхностных слоев, предварительно разрыхленных коррозионными и усталостными процессами. В зоне контакта образуется повышенное количество продуктов износа, что способствует интенсификации процессов разрушения вплоть до возникновения абразивного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

Существенное влияние на процесс изнашивания при фреттинг - коррозии оказывает давление на поверхности контактирующих поверхностей (рис. 4.6).



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 - коррозии являются натирные поверхности, 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.

4.2. Закономерности изнашивания деталей машин.

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. 4.7).

В первый период ($t_{п}$) осуществляется микро- и макрогеометрическая приработка поверхностей трения деталей и в некоторой степени стабилизируются показатели их технического состояния. Происходит разрушение микронеровностей поверхностей трения деталей. В этот период скорость изнашивания монотонно убывает до значения $\gamma = \text{const}$, характерного для периода $t_{ни}$ установившегося (нормального) изнашивания. 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, 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.

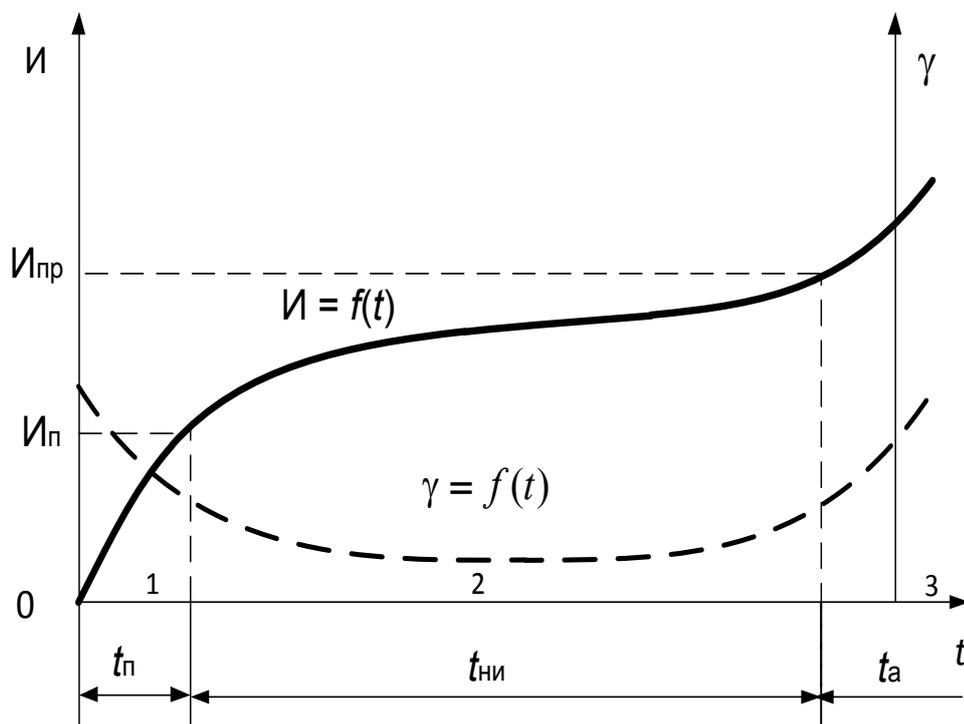


Рис. 4.6. Кривая изнашивания деталей машин: t_p - период приработки; $t_{ни}$ - период нормального изнашивания; t_a - аварийное изнашивание; I_p - износ за период приработки; $I_{пр}$ - предельный износ; $I = f(t)$ - кривая износа;

$\gamma = f(t)$ - скорость изнашивания

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

Кривая изнашивания в большинстве случаев совпадает с закономерностями возникновения отказов и неисправностей машин. Параметр потока отказа, например, в общем случае также является функцией времени – он зависит от того периода наработки, в пределах которого оценивается его значение (см. рис.1.5).

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

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

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

Для большинства конструктивных элементов современных машин продолжительность этого периода незначительна (для автомобилей, например, она составляет 3 – 3,5% их ресурса). За этот период устанавливается «равновесная» шероховатость, характерная для нормального периода изнашивания $t_{ни}$ и практически остающейся постоянной на всем протяжении этого периода. При этом, исходная (начальная) шероховатость не оказывает влияния на равновесную установившуюся (рис. 4.8).

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

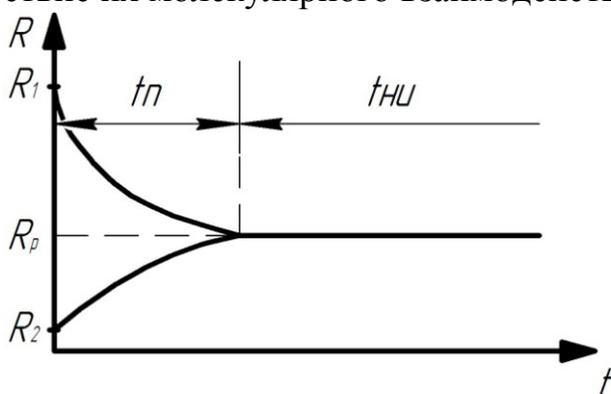


Рис. 4.8. Изменение шероховатости поверхностей за период приработки

Под действием сил молекулярного притяжения происходит разрушение и перенос материала с одной поверхности на другую, в результате чего формируется новый рельеф поверхности с шероховатостью, близкой к равновесной. Поэтому при изготовлении деталей необходимо стремиться к тому, чтобы исходная (технологическая) шероховатость

их поверхностей была близкой к равновесной, характерной для нормального периода изнашивания. Это сводит к минимуму период приработки деталей и существенно повышает их долговечность.

4.3. Количественные характеристики процесса изнашивания

Для оценки процесса изнашивания деталей машин используются

следующие три показателя: износ, скорость изнашивания и интенсивность изнашивания.

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

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

$$\gamma = U / t \text{ (мкм/ч)} \quad (4.2)$$

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

$$J = U / L \quad (4.3)$$

Изнашивание деталей происходит преимущественно в период установившегося режима эксплуатации машин (для автомобилей, например, этот период составляет 95% их ресурса). В этот период скорость изнашивания γ примерно постоянна (см. рис. 4.7), поэтому зависимость между величиной износа и наработкой считают линейной

$$I = \gamma t, \quad (4.4)$$

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

С учетом приработки эта зависимость выглядит следующим образом:

$$I = I_n + \gamma t, \quad (4.5)$$

где I_n – износ за период приработки.

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

Предельное значение износа соответствует такому состоянию изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или экономична

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 масел в агрегатах связана с их старением и изменением смазочных и других эксплуатационных свойств; замена или ремонт детали диктуется износом хотя бы одной ее рабочей поверхности до предельного значения.

Определение предельного состояния, т.е. установление их нормативных значений, является сложной задачей, так как при конструировании, как правило, назначаются допустимые пределы изменения выходных параметров только для машины в целом или для ее отдельных агрегатов. Однако объективная оценка надежности сложного изделия требует установления предельных 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, 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. 4.9). 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.

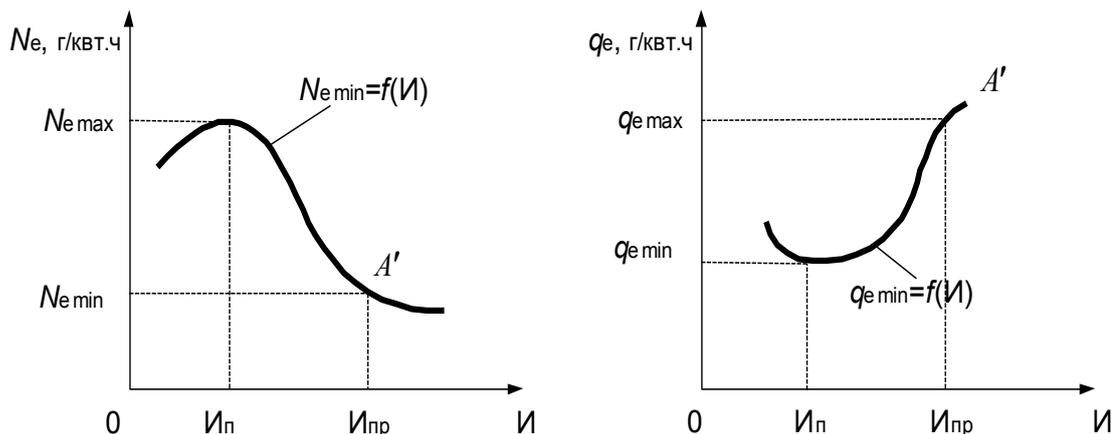


Рис. 4.9. Графики изменения эффективной мощности N_e и удельного расхода топлива g_e от степени износа двигателя

В первом периоде работы двигателя (участок $0 - I_n$), периоде приработки деталей, коэффициент трения большой и потери мощности на работу сил трения максимальные. По мере приработки деталей потери мощности на преодоление внешнего трения снижаются, эффективная мощность при всех прочих равных условиях работы двигателя повышается.

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

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

Таким образом, технические условия на выходные параметры различных машин и агрегатов служат основой для назначения допусков на предельные состояния для узлов и деталей, входящих в изделие.

При оценке работоспособности агрегата, механизма, узла необходимо установить предельно-допустимые значения износов их деталей и сопряжений. Нормативы 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 ее надо менять или восстанавливать.

Из анализа кривой, выражающей в общем виде процесс изнашивания детали (см. рис. 4.7) ее предельный износ определяется критической точкой В.

Установление этой точки имеет очень важное практическое значение. Если деталь или группа деталей, принадлежащих одному агрегату, в результате изнашивания достигнет критической точки В, и агрегат не будет отправлен в ремонт, то прогрессирующая скорость изнашивания неизбежно приведет к поломке как данной детали, так и других сопряженных с ней деталей. 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, то 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 двух основных групп сопряжений: кривошипно-шатунной и цилиндро-поршневой. 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 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 показывают исследования [1], изменение геометрической формы шеек (в основном некруглости) резко снижает долговечность сопряжения. Так, например, увеличение некруглости шейки в 2 раза (по сравнению с номинальной) снижает наработку вкладыша до начала разрушения в 8 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 экономичности двигателя.

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

При ремонте автомобилей 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 может быть установлено при известной кривой изнашивания и установленном норматива предельного износа детали (рис. 4.10).

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

$$t_{пр} = \frac{I_{пр}}{\gamma}, \quad (4.6)$$

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

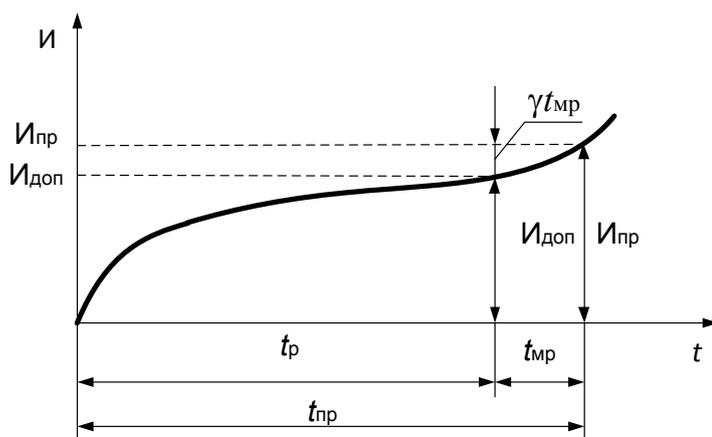


Рис. 4.10. Схема определения допустимого износа

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

$$I_{\text{мр}} = \gamma t_{\text{мр}}. \quad (4.7)$$

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

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{пр}} - \gamma t_{\text{мр}}. \quad (4.8)$$

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

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{пр}} - \frac{I_{\text{доп}} t_{\text{мр}}}{t_{\text{р}}} = \frac{I_{\text{пр}}}{1 + \frac{t_{\text{мр}}}{t_{\text{р}}}}. \quad (4.9)$$

Если с начала эксплуатации данный ремонт не первый, а k -й, то $t_{\text{р}} = kt_{\text{мр}}$.

Тогда допустимый износ будет равен:

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пр}}}{1 + t_{\text{мр}}/kt_{\text{мр}}} = \frac{k}{k+1} I_{\text{пр}}. \quad (4.10)$$

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

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

По формуле (4.10) определяем допустимый износ:

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

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

Определение допустимых зазоров сопряжений может быть представлено схемой (рис. 4.11). Если известны экспериментальные кривые износа двух сопряженных деталей и величина предельного зазора, то допустимое значение зазора, при котором сопряжение не потеряет работоспособность в течение очередного межремонтного периода, находится следующим образом.

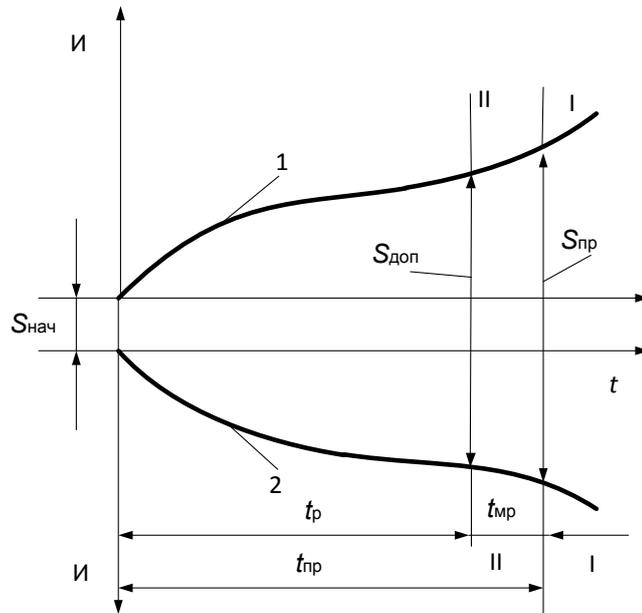


Рис. 4.11. Схема определения допустимого зазора в сопряжении: $S_{нач}$ - начальный зазор в сопряжении; $t_{пр}$ - наработка до предельного состояния сопряжения; $t_{р}$ - наработка с начала эксплуатации до данного ремонта

Влево от вертикали I – I, определяющей предельное состояние сопряжения, откладывается значение межремонтной наработки $t_{мр}$ и проводится вертикаль II – II. Величина $S_{доп}$, соответствующая размеру между кривыми изнашивания 1-й и 2-й деталей, и будет соответствовать значению допустимого зазора в сопряжении.

Если фактическое значение зазора $S_f \leq S_{доп}$, то такое сопряжение восстанавливать нецелесообразно, т.к. оно проработает в течение $t_{мр}$ без потери работоспособности. Если $S_f > S_{доп}$, сопряжение необходимо ремонтировать.

Пересечение вертикали II – II с линиями износа деталей 1 и 2 и линиями начального зазора сопряжения $S_{нач}$ соответствуют допустимым износам этих деталей. Если одна из деталей сопряжения имеет больший предельный и, соответственно, допустимый износы, то восстановление работоспособности такого сопряжения возможно за счет ремонта или замены только одной детали.

Оценка предельных и допустимых состояний изделий является весьма важным и необходимым этапом при построении моделей их отказов. Для определения их количественных значений необходимо выявить зависимости снижения эффективности функционирования машины от измене-

ния ее технического состояния, вызываемого изнашиванием деталей и сопряжений.

4.4. Методы измерения износа деталей и сопряжений

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

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

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

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

Качение без скольжения, т.е. обкатка двух тел вызывает усталость поверхностных слоев, которая проявляется в виде отслаивания мелких частиц металла с поверхности контакта. Это относится, например, к подшипникам качения, роликам кулачковых механизмов и другим деталям автомобиля. При недостаточной твердости материалов и больших удельных давлениях усталостное изнашивание может сопровождаться пластической деформацией.

При качении с относительным скольжением, как это имеет место в зубчатых передачах, наблюдаются и *износ*, и *усталость*, а в ряде случаев и *смятие* поверхности (рис. 4.12). Зона усталости расположена там, где относительное скольжение минимально или равно нулю (зона начальной окружности зуба). Зона более интенсивного износа расположена в местах

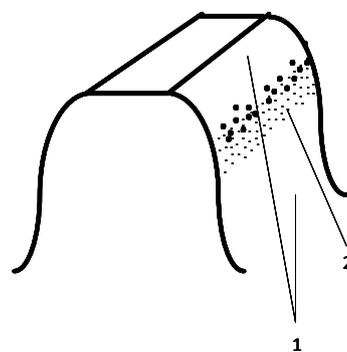


Рис. 4.4. Схема изнашивания зуба шестерни:
1 - зона наибольшего износа; 2 - зона усталостного изнашивания

большого относительного скольжения (головка и ножка зуба).

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

При выборе методов и средств измерения износа необходимо учитывать совокупность метрологических, эксплуатационных и экономических показателей. К метрологическим показателям относятся: допустимая погрешность измерительного прибора, цена деления шкалы, порог чувствительности, пределы измерения и др. К эксплуатационным и экономическим показателям относятся: стоимость и надежность измерительных средств, срок их службы, продолжительность 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, по изменению радиоактивности детали.

С помощью интегральных методов определяется общий (суммарный) износ деталей сопряжения или сборочной единицы в целом. Наиболее известными из них являются методы измерения 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 различных штангенинструментов, микрометров, индикаторов или других приборов, точность которых обычно находится в пределах 1 – 10 мкм. Метод относится к традиционным методам измерения размеров и к его достоинствам следует отнести простоту и несложность используемого инструмента. Для повышения точности микрометрических измерений в лабораторных условиях широко используются разнообразные по конструктивному исполнению и принципу действия опико – механические приборы. Повышение точности измерений этих приборов достигается либо сочетанием механических передаточных механизмов с оптическим устройством (оптиметры), либо благодаря значительно-

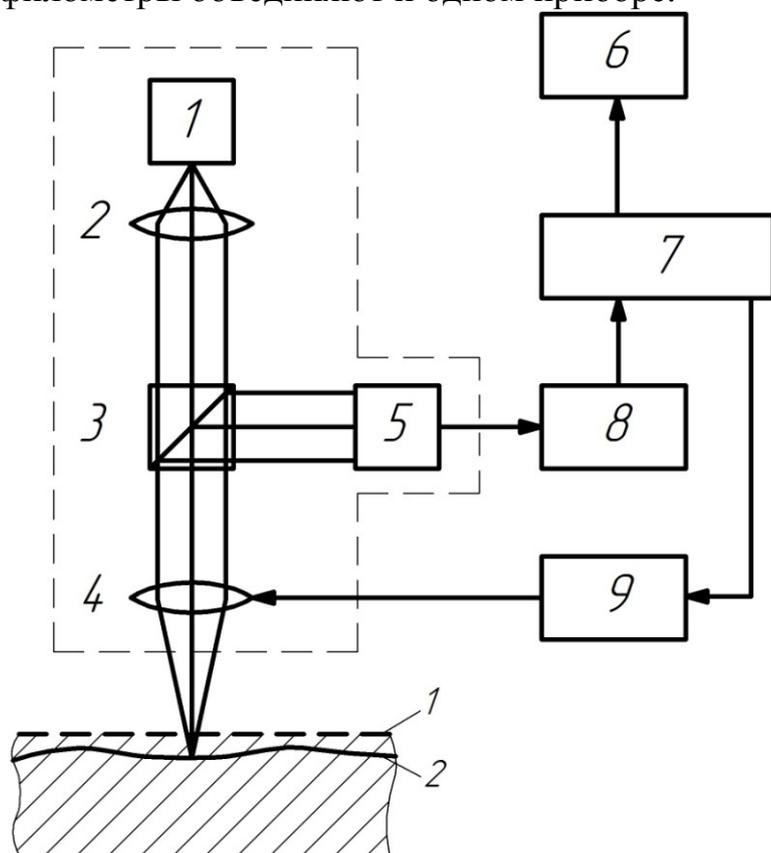
му увеличению измеряемых объектов или шкал (микроскопы, проекторы и др.).

К недостаткам метода относятся:

- невозможность измерения износа в процессе работы машины и необходимость, как правило, частичной разборки узла и демонтажа измеряемой детали;

- изменение размера может быть следствием не только изнашивания поверхности, но и результатом деформации (измерение износа в этом случае носит условный характер).

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



С помощью этого метода измеряют, например, 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. 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 (рис. 4.13).

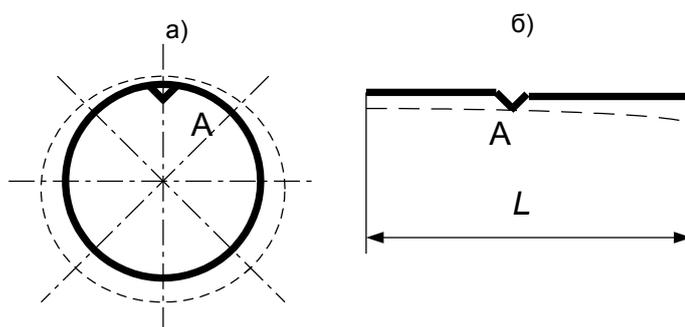


Рис. 4.13. Схемы совмещения профилограмм:
 а – гильзы цилиндров двигателя; б – шейки вала
 в продольном сечении; А – метка для совмещения;
 L – длина измеряемого участка; — исходный профиль;
 - - - - - профиль после цикла испытаний

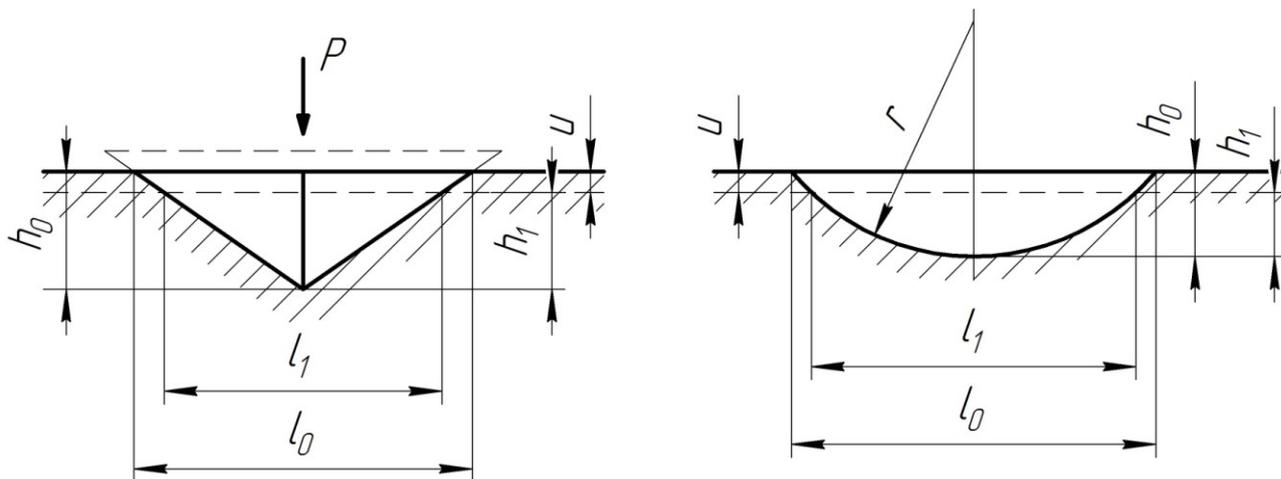
Метод профилографирования относится к достаточно точным методам измерения износов. На погрешность оценки износа оказывает точность установки измерительного наконечника относительно контролируемой поверхности и точность совмещения профилограмм. Оценка износа с помощью этого метода является разновидностью метода микрометрирования, поэтому для него характерны те же недостатки.

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 и вырезанных лунок.

Метод отпечатков предусматривает нанесение углубления с помощью алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине между противоположными гранями $\alpha = 136^\circ$ (рис. 4.14 а). Пирамида вдавливается в испытуемую поверхность под нагрузкой P с помо-

щью 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:

$$I = h_0 - h_1 = \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} (l_0 - l_1). \quad (4.11)$$



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

Метод вырезанных лунок лишен этих недостатков. Лунка на поверхности трения детали вырезается с помощью вращающегося алмазного резца и по уменьшению ее размеров судят о величине износа (рис. 4. 14 б). Величина износа измеряется такими приборами, как УПОИ-6, оптико-механическим индикатором износа ОМИ-1 и др. Для плоских поверхностей значение износа определяется из выражения:

$$I = 0,125 (l_0^2 - l_1^2) / r \quad (4.12)$$

Для цилиндрических поверхностей

$$I = 0,125 (l_0^2 - l_1^2) (1/r \pm 2/R), \quad (4.13)$$

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 (рис.4.15).

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

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

Метод поверхностной активации используется для контроля износа деталей при стендовых и дорожных испытаниях без остановки и разборки машины. Его использование позволяет измерять малые износы, что существенно сокращает продолжительность износных испытаний, исследовать динамику изнашивания, автоматизировать операции контроля. Небольшой уровень радиации (порядка 10 мкКи) не требует специальной радиационной защиты.

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

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

$$K_{\text{ни}} = \frac{q}{q_{\phi} + q_{\gamma}}, \quad (4.14)$$

где q , q_{ϕ} , q_{γ} – 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 $K_{\text{ни}}$ по наработке (рис. 4.16).

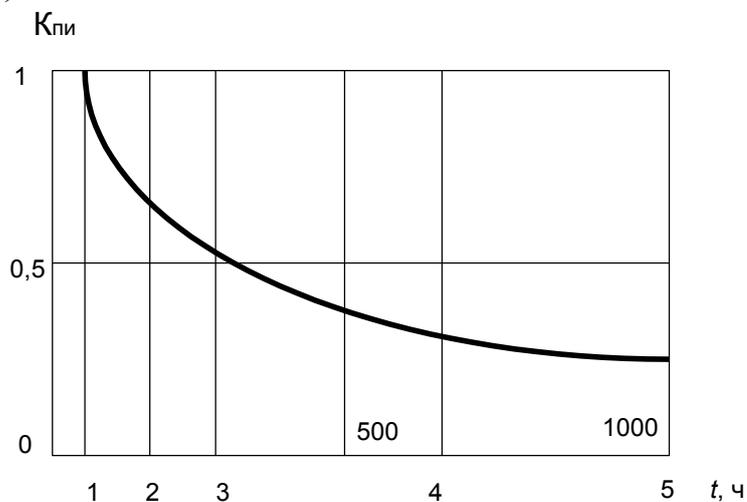


Рис. 4.16. Изменение концентрации продуктов изнашивания двигателя в масле: 1 – новый двигатель; 2 – после наработки 100ч; 3 – после наработки 300 ч; 4 – после наработки 600 ч; 5 – после наработки 1000 ч

Кривая показывает, что в период приработки интенсивность изнашивания постепенно уменьшается и на определенной наработке стабилизируется. Для получения достоверных результатов пробы масла должны отби-

раться на прогревом двигателе, не позднее, чем через 20 мин после его остановки.

Для анализа продуктов изнашивания в масле используют различные методы (химические, спектральные, радиометрические, активационные, оптико-физические).

Химический метод основан на содержании металлических частиц износа в золе сожженной пробы масла. Метод достаточно сложен и трудоемок, поэтому применяется при измерении износа редко.

Спектральный метод основан на определении содержания продуктов изнашивания по спектральному анализу пламени сгораемой пробы масла. Метод характеризуется высокой трудоемкостью, сложностью, необходимостью наличия высококвалифицированного персонала.

Радиометрический метод основан на измерении радиоактивных продуктов изнашивания в масле, являющихся результатом износа деталей облученных радиоактивными изотопами.

Активационный метод представляет собой комбинацию спектрального и радиометрического методов. Содержание продуктов изнашивания в масле определяется по их радиоактивности посредством анализа спектров гамма-излучения пробы после ее облучения нейтронами.

В последние годы при оценке износа все шире применяются *оптико-физические методы*. Содержание продуктов изнашивания в масле определяется с использованием современных приборов, которые автоматически регистрируют механические частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в прозрачной жидкости.

Недостатком рассмотренных методов определения износа по содержанию продуктов изнашивания в пробе отработанного масла является высокая стоимость используемого оборудования, а также невозможность оценки линейного износа одной конкретной детали.

Метод определения износа по изменению выходных параметров функционирования не требуют разборки изделий и поэтому весьма перспективен для оценки их технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Так, например, о степени повреждения многих узлов трения можно судить по возрастанию температуры и коэффициента трения. Степень износа цилиндро-поршневой группы двигателя оценивают по угару масла, падению давления в конце такта сжатия (компрессии), изменению состава отработавших газов и др.

Для гидро- и пневмоаппаратуры о процессе изменения технического состояния из –за изнашивания деталей и увеличения зазора судят по возрастанию утечек и падению давления.

Таким образом, метод позволяет оценить значения износов или других повреждений изделия по изменению его выходных параметров, минуя этап их непосредственного измерения (рис. 4.17).



Рис. 4.17. Схема оценки степени повреждения по изменению выходных параметров

Оценка степени повреждения по выходным параметрам часто применяется для сложных изделий, когда на эти параметры влияют несколько процессов, одновременно протекающих в разных элементах конструкции. Например, при оценке технического состояния насоса в результате износа ряда его элементов (плунжеров, клапанов и др.) измеряют такие его выходные параметры, как производительность, давление, развиваемое на выходе, равномерность подачи жидкости.

Контрольные вопросы

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. Что понимается под усталостным изнашиванием деталей?
6. Раскройте сущность молекулярно-механического изнашивания.
7. Какие физические процессы приводят к коррозионно-механическому изнашиванию?
8. Какие стадии включает в себя классическая форма кривой изнашивания?
9. Какими показателями оценивается процесс изнашивания?

10. Как определяются предельные и допустимые износы деталей и сопряжений?

Глава 5. Основные факторы, определяющие интенсивность изнашивания

При изучении процесса изнашивания учитывают внешние механические воздействия, факторы внешней среды и свойства материалов трущихся поверхностей. Условно их можно разделить на следующие группы:

- *конструктивные* (силовые нагрузки и кинематические параметры сопряжения, вид трения и смазки рабочих поверхностей, механические характеристики материалов пар трения);
- *технологические* (структура и физико-механические свойства поверхности трения, наличие остаточных напряжений в поверхностном слое, макро - и микрогеометрия рабочих поверхностей);
- *эксплуатационные* (условия эксплуатации, качество эксплуатационных материалов, организация технического оборудования и ремонта, квалификация персонала и т.д.).

5.1. 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

$$\gamma = k P^m v^n, \quad (5.1)$$

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

В частности, для абразивного и ряда других видов изнашивания $m = n = 1$, т.е. зависимость (5.1) в данном случае носит линейный характер

$$\gamma = k P v. \quad (5.2)$$

Зависимость износа от этих факторов будет тогда описываться выражением

$$u = \gamma t = k P v t = k P L, \quad (5.3)$$

где $L = v t$ – путь трения.

Все физические условия процесса изнашивания, кроме давления и скорости относительного перемещения (свойства материалов, смазка, температура и др.) в выражениях 5.1 – 5.3 учитываются коэффициентом k .

Линейный характер изнашивания сохраняется лишь в диапазоне нормального (стационарного) режима работы узла трения. Выход условий за пределы нормального изнашивания приводит или к неустойчивости процесса, или к повреждению (схватыванию поверхности, задиру и т.д.).

Для практических целей значения P и v должны выбираться из условия, что изнашивание возможно (допускается) только в условиях стационарного участка (участки 2 на рис. 5.1,а и 1 на рис. 5.1, б), когда интенсивность изнашивания примерно постоянна (устойчива) и минимальна по сравнению с ее величиной на других участках. При нормальной эксплуатации узлы трения работают исключительно в стационарной области (области нормального изнашивания). В то же время вероятность нарушения нормальных условий на практике достаточно велика.

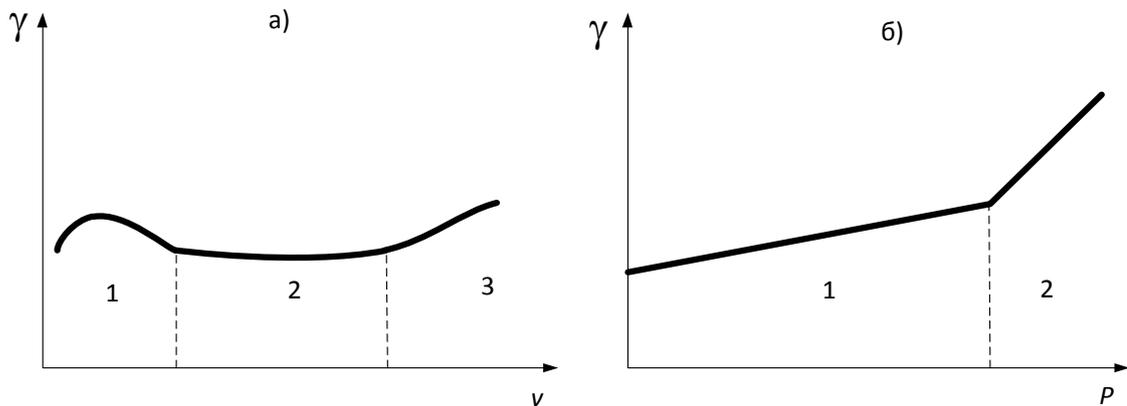


Рис. 5.1. Зависимости интенсивности изнашивания γ от скорости относительного скольжения v и давления P на поверхности трения

Основным признаком нормального изнашивания является то, что разрушение поверхности локализуется в тончайших поверхностных слоях вторичных структур, образующихся при трении в условиях динамического равновесия механического процесса образования и разрушения этих структур.

Из формулы (5.3) и рис.5.1а видно, что при нормальном режиме эксплуатации износ не зависит от скорости относительного скольжения, а зависит от давления на поверхность трения P и пути трения L . Влияние ско-

рости относительного скольжения сказывается лишь на температуре поверхности трения.

При малых скоростях скольжения (участок 1) и удельных давлениях, превышающих предел текучести, облегчается взаимодействие кристаллических решеток и создаются условия для схватывания I рода с образованием локальных металлических связей. При больших скоростях скольжения (участок 3) возникают тепловые явления, интенсифицирующие адгезионное (молекулярное) взаимодействие трущихся поверхностей, образование металлических связей, перенос металла с одной (менее прочной) поверхности на другую (схватывание II рода).

Поверхности скольжения при схватывании приобретают катастрофический вид повреждения, поэтому изнашивание при скоростях, соответствующих участкам 1 и 3 не допускается.

5.2. Влияние температуры поверхности трения на интенсивность изнашивания

В процессе работы сопряжений значительная часть потребляемой машиной энергии расходуется на выделение теплоты. Экспериментально установлено, что работа сил трения главным образом преобразуется в теплоту, и только незначительная ее часть потребляется трущимися поверхностными слоями деталей при их деформации и разрушении. Поэтому можно считать, что количество выделяемой теплоты от работы трения носит линейный характер.

Теплота, выделяемая при трении, частично расходуется на нагрев материала деталей, а частично поглощается окружающей средой. Изменение температуры поверхности трения Δt пропорционально приращению количества теплоты ΔQ , приходящееся на единицу поверхности в единицу времени

$$\Delta t = c \Delta Q, \quad (5.4)$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Износ и интенсивность изнашивания для большинства материалов деталей с повышением температуры увеличиваются. Однако, в некоторых пределах такое повышение вполне допустимо, если не нарушается установившееся коррозионно-механическое изнашивание. При нарушении нормальных условий трения, когда давление P и скорость относительного перемещения v выходят за пределы стационарного участка (см. рис. 5.1),

происходит резкое изменение вторичных структур поверхностных слоев сопряженных деталей, смазывающей способности масла и, как следствие – увеличение интенсивности изнашивания.

Зависимость интенсивности изнашивания от температуры является довольно сложной, однако, с достаточной для практических целей точностью для граничного и близких к нему видов трения ее можно принять линейной:

$$\Delta \gamma = b\Delta t, \quad \gamma = \gamma_0 + b\Delta t, \quad (5.5)$$

где $\Delta \gamma$, Δt – изменение интенсивности изнашивания и температуры соответственно; b – коэффициент пропорциональности; γ_0 – интенсивность изнашивания при $\Delta t = 0$.

Для поверхностей, смазываемых под давлением, зависимость интенсивности их изнашивания от изменения температуры масла в картере двигателя Δt_1 отличается от линейной

$$\gamma = \gamma_0 - b\Delta t_1 + c (\Delta t_1)^2 \quad (5.6)$$

Существует оптимальная температура масла, при которой интенсивность изнашивания минимальна (рис. 5.2). При большем или меньшем ее значении интенсивность износа деталей цилиндро-поршневой группы возрастает.

Оптимальной температуре картерного масла соответствует оптимальное значение температуры поверхностей теплонагруженных деталей. При ее повышении закономерно изменяются температура в зоне трения, химико-физические свойства структуры поверхностей деталей, смазывающая способность масла, коэффициент трения, и как следствие, интенсивность изнашивания.

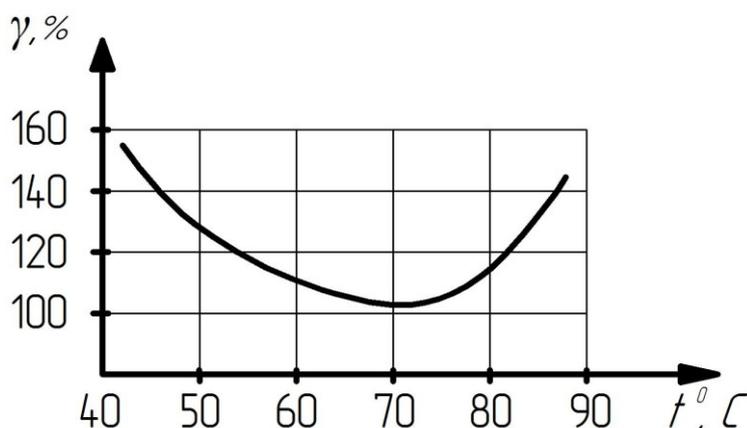


Рис.5.2. Изменение интенсивности изнашивания γ цилиндров двигателя (расстояние 8мм от верхней плоскости блока)

от температуры масла в картере t

При пониженных температурах деталей цилиндро-поршневой 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.

Интенсивность изнашивания резко возрастает и с ростом температуры масла. Это происходит из за того, что при высоких температурах ослабляются молекулярные связи в масле, нарушается их адсорбция на поверхность трения и в результате 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.

5.3. Влияние на изнашивание вида трения и смазки

Изнашивание деталей всегда связано с их относительным перемещением и происходит при любом виде трения (скольжения, качения, качения с проскальзыванием). При этом трение в механизмах машин может играть как положительное, так и отрицательное значение. Положительную роль оно играет в таких элементах конструкций, как заклепочные и резьбовые соединения, тормозные механизмы, ременные и фрикционные передачи, принцип действия которых основан на использовании трения. Отрицательное влияние трения проявляется в двух формах: во-первых, как вредное сопротивление движению, приводящее к бесполезному рассеиванию энергии и нагреву узлов трения; во-вторых, как изнашивание деталей.

Трение представляет собой сложный физико-химический процесс, зависящий от условий нагружения рабочих поверхностей детали, свойств материала, из которого изготовлены сопряженные элементы, наличия и вида смазки, состояния поверхностей трущихся тел и т.п.

5.3.1. Влияние на изнашивание вида трения

В зависимости от состояния поверхностей трущихся элементов и наличия смазки различают следующие виды трения скольжения (рис. 5.3.):

- сухое, когда между поверхностями отсутствует смазка и загрязнение поверхностей;
- граничное, когда трущиеся поверхности отделены друг от друга чрезвычайно тонким слоем смазки, не обладающим свойствами жидкости;
- жидкостное, когда поверхности полностью разделены слоем жидкой смазки.

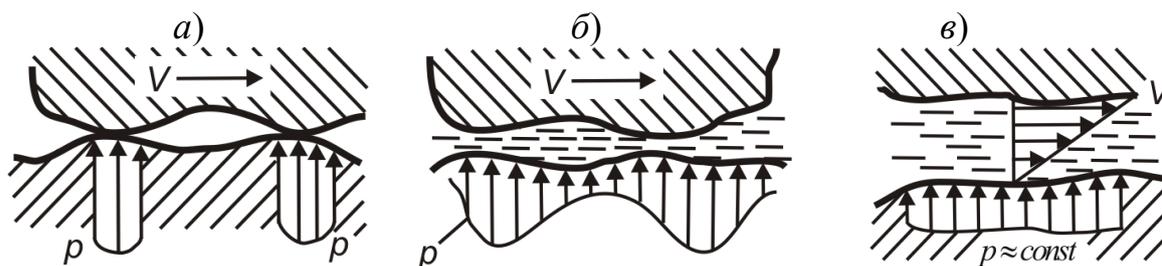


Рис. 5.3. Виды трения: а – сухое; б – граничное; в – жидкостное

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 разрыву.

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.

Слой смазки устраняет непосредственный контакт двух поверхностей, благодаря чему не только значительно уменьшаются силы трения, но и создаются условия для резкого уменьшения износа поверхностей.

При жидкостном трении каждый участок поверхности нагружен постоянным давлением, не изменяющимся при относительном перемещении

сопряженных деталей ($P = \text{const}$). Эта нагрузка не в состоянии разрушить микровыступы, так как возникающие напряжения находятся в области больших запасов прочности. Однако в соответствии с гидростатической теорией смазки даже без непосредственного контакта незначительный износ поверхностей все же наблюдается. В основном, это является результатом физико-химических, в том числе электростатических процессов, возникающих между трущимися поверхностями и их контакта со смазочным материалом.

Коэффициент трения при жидкостном контакте поверхностей выражается соотношением

$$f = \frac{k \cdot \eta \cdot v}{P}, \quad (5.7)$$

где k – коэффициент пропорциональности; η – динамическая вязкость смазочного материала; v – скорость скольжения; P – нормальная нагрузка или 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.

Однако жидкостное трение обладает рядом недостатков: во-первых, оно связано с существенным усложнением конструкции системы смазки, во-вторых, наличие масляного слоя между поверхностями может нарушить точность перемещения узла.

При граничном трении поверхности сопряженных деталей разделены слоями смазочного материала очень малой толщины (до 0,1 мкм). Практически в местах контакта трущиеся детали разделены лишь слоями молекул смазки, которые адсорбированы на поверхностях трения. Наличие граничного слоя или граничной пленки снижает силы трения по сравнению с трением без смазочного материала в 2 ... 10 раз и в сотни раз уменьшает износ 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 сопротивление материалу пластическому деформированию.

Механизм изнашивания при граничном трении заключается в следующем. При работе сопряжений под нагрузкой на участках контакта (в местах сближения микронеровностей) возникают напряженные зоны, упругие и пластические деформации, создаются условия для усталостного разрушения микровыступов. Кроме того, на участках с более высокими значениями давлений и температурных всплесков может произойти разрушение смазочной пленки с возникновением молекулярного взаимодействия обнажившихся микровыступов поверхностей деталей и даже их схватывание.

Высокая подвижность молекул смазочного материала способствует их адсорбции в места разрушения граничной пленки с большей скоростью, что объясняет их свойство быстрого «самозалечивания» и предупреждения лавинообразного процесса схватывания.

В целом граничное трение существенно уменьшает по сравнению с сухим скорость изнашивания и коэффициент трения. В табл. 5.1 приведены значения коэффициента трения для некоторых пар трения в зависимости от наличия слоя смазки.

Таблица 5,1

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 др.). Полужидкостная смазка, например, характерна для большинства зубчатых передач и подшипников качения.

Нормальная нагрузка при полужидкостном трении уравнивается нормальной составляющей сил взаимодействия поверхностей по площадкам их контакта и силами гидродинамического давления в смазочном слое. Непременным условием создания гидравлического давления в слое

смазки является возникновение сужающегося клиновидного зазора, в котором масло при трении образует подъемную силу (рис. 5.4).

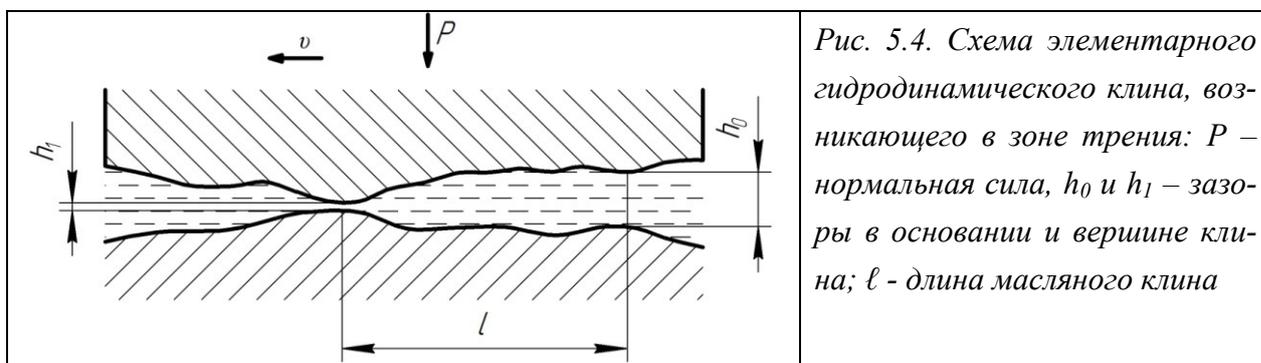
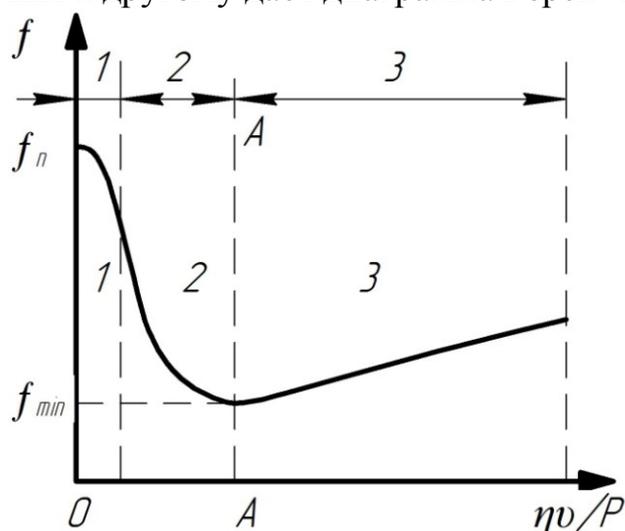


Рис. 5.4. Схема элементарного гидродинамического клина, возникающего в зоне трения: P – нормальная сила, h_0 и h_1 – зазоры в основании и вершине клина; l – длина масляного клина

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. 5.5).



На диаграмме линия $A - A$, проходящая через точку минимума коэффициента трения f_{min} отделяет область жидкостного трения (3) от двух видов. При близких к нулю режимах работы сопряжения коэффициент трения имеет максимальное значение ($v=0, f=1$), что соответствует трению покоя.

Рис. 5.5. Зависимость коэффициента трения от режима работы сопряжения

При небольшом увеличении нагрузки P и скорости v (область трения 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. 5.1).

С дальнейшим ростом нагрузочного и скоростного режима работы сопряжения (параметра $\eta v/P$) толщина смазочного слоя увеличивается, снижаются механические и молекулярные воздействия на поверхность трения и создаются условия для полужидкостного трения (область 2).

Если режим работы сопряжения переходит в зону 3, то поверхности трения полностью разделены слоем смазочного материала, который полностью закрывает высоту их неровностей и наступает жидкостной режим смазки.

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, параметр режима работы сопряжения $\eta v/P$. 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.

5.3.2. Выбор смазочных материалов

Интенсивность изнашивания деталей машин во многом зависит от качества используемых смазочных материалов. От современных масел, применяемых в автомобилях, дорожно-строительных машинах, тракторах требуется, во-первых, создание прочной поверхностной оксидной пленки, обладающей повышенной износостойкостью, и во-вторых, устранение механического взаимодействия трущихся поверхностей деталей. Кроме того, смазочные масла выполняют следующие функции:

- уменьшают трение, возникающее между сопряженными деталями;
- предотвращают атомно-молекулярное взаимодействие материалов поверхностных слоев;
- защищают детали от коррозионного воздействия внешней среды;

- отводят тепло и продукты изнашивания из зоны трения.

Практически любое смазочное масло представляет собой масляную основу (базовое масло), в которую вводят присадки разного функционального назначения. По своему происхождению смазочные масла подразделяются на минеральные, органические и синтетические.

В качестве сырья для получения минеральных масел служат в основном нефть, а также каменный уголь и сланцы. Органические масла являются продуктами животного или растительного происхождения. Синтетические смазочные материалы получают путем синтеза различных органических соединений.

По назначению смазочные масла подразделяются на моторные, трансмиссионные и промышленные общего назначения.

Моторные масла служат для смазки трущихся поверхностей поршневых двигателей внутреннего сгорания автомобилей и других транспортных машин.

Трансмиссионные масла применяются для смазки зубчатых передач, шарнирных и других трущихся соединений агрегатов трансмиссии.

Промышленные масла общего назначения используются в качестве рабочих жидкостей систем гидропривода, а также для смазки станков и другого промышленного оборудования.

Отдельный класс смазочных материалов занимают *пластические (консистентные) смазки*, которые получают загущением минеральных или синтетических масел.

Эксплуатационные свойства жидких смазочных материалов

Качество смазочных материалов при выполнении заданных функций определяется совокупностью их эксплуатационных свойств. К важнейшим из них относятся:

- вязкостно-температурные;
- смазочные;
- противокоррозионные;
- антиокислительные;
- моюще-диспергирующие;
- противопенные.

Вязкость является основным свойством смазочного материала и представляет собой его способность оказывать сопротивление относительному перемещению слоев. Это свойство характеризует внутреннее трение слоев смазки, сила которого определяется по формуле:

$$F = \eta \cdot S \cdot dv / dx \quad (5.8)$$

где η – динамическая вязкость смазочного материала; S – площадь слоя смазки (поверхности трения); dv / dx – градиент скорости сдвига слоев смазки в направлении, перпендикулярном движению.

Вязкостные свойства масел оценивают с помощью динамической и кинематической вязкости. Динамическая вязкость η измеряется в паскаль секундах (Па · с).

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

$$\nu = \eta / \rho, \quad (5.9)$$

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

$$\rho = m / V. \quad (5.10)$$

Вязкость масла изменяется с изменением температуры. С понижением температуры она существенно возрастает, что отражается на эксплуатационных характеристиках работы машин (затрудняется пуск двигателя, увеличиваются потери мощности на трение сопряженных поверхностей разделенных слоев масла и др.). 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, тем выше его вязкостные свойства. Для двигателей внутреннего сгорания автомобилей в зависимости от степени их форсирования используют масла с индексом вязкости ИВ = 120 – 150.

Для сглаживания вязкостно-температурных характеристик и повышения ИВ масел в них вводятся различные загущающие (КП-5, КП-10, КП-20, В-1, В-2) и депрессорные (Д, АФК и др.) 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 сма-

зывания узлов и механизмов, работающих в условиях больших перепадов температур.

Смазочные свойства масел объединяют в себе одновременно несколько свойств, влияющих на процессы трения и изнашивания контактирующих поверхностей в узлах и механизмах машин. Основными из них являются противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства. Для придания базовым маслам этих свойств в их состав вводят соответствующие присадки.

Противоизносные свойства масла характеризуют их способность снижать интенсивность изнашивания трущихся поверхностей. Это свойство масел обеспечивается введением в них присадок ЭФО, ДФ-11, ВНИИ НП-354.

Для улучшения *противозадирных свойств масел*, препятствующих возникновению молекулярно-механического изнашивания трущихся поверхностей и образованию на них задиров, используются такие присадки, как ЛЗ-23к, ЛЗ-28, ДФ-1, ОТП и др.

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, КТП, ГС-1, ПАФ-4, Фриктол.

Противокоррозионными свойствами масел называют их способность не оказывать коррозионного воздействия на детали машин и механизмов, выполненных из металлов.

Коррозионная агрессивность масла обусловлена прежде всего, накоплением в процессе его окисления большого количества продуктов кислотного характера, а также химической активностью самого масла, увеличивающуюся при введении в него противоизносных присадок.

Снижение коррозионной агрессивности смазок достигается за счет добавок к маслу противокоррозионных присадок АКОР-1, ЦИАТИМ-239, В15-41 и др., образующих на поверхности металла защитные пленки.

Антиокислительные свойства масла характеризуют его устойчивость к окислению. В процессе эксплуатации машин смазочные масла под действием высоких температур каталитического действия, металлической поверхности и других факторов подвергаются различного рода окислительным процессам. Окисление масла является нежелательным процессом, так как ухудшает его эксплуатационные свойства.

При окислении моторного масла, в частности, ухудшается его вязкостно-температурная характеристика, образуются различные отложения (нагары, лаки, шламы), а также ухудшающие эффективность работы двигателей внутреннего сгорания и интенсифицирующие процессы изнашивания деталей их механизмов и узлов.

Для снижения склонности масел к окислению в них вводят антиокислительные присадки (ингибиторы окисления) – ДФ-11, ДФБ, ВНИИНП-715, ЛАНИ-317 и др.

Моюще-диспергирующие свойства масел характеризуют способность масел препятствовать прилипанию загрязняющих примесей к поверхностям деталей, в основном, двигателей. Для улучшения моющих свойств и предупреждения образования углеродистых отложений повышают антиокислительную способность моторных масел, а также вводят в них специальные моюще-диспергирующие присадки: С-150, ЦИАТИМ-339, ИХП-101, ПМСЯ и др.

Противопенные свойства масел определяют их способность предотвращать образование пены или ускорять ее разрушение. Пенообразование возникает вследствие интенсивного перемешивания и разбрызгивания масла при работе двигателя, его циркуляции по маслопроводам, наличия в масле воды и продуктов окисления. В результате пенообразования нарушается нормальный процесс смазывания трущихся поверхностей, интенсифицируется окисление масла. В качестве противопенной присадки к смазочным маслам широко используется *поликсилосаны* – ПМС-200А.

Перечисленными эксплуатационными свойствами должны обладать как моторные, так и трансмиссионные масла. Учитывая то, что трансмиссионные масла, используемые в коробках передач, ведущих мостах, раздаточных коробках автомобилей, тракторов, дорожных и строительных машин, работают в условиях высоких удельных давлений, поэтому они имеют более высокую вязкость, чем моторные. Кроме того, они должны обладать повышенными смазочными свойствами (противоизносными и противозадирными).

Для улучшения эксплуатационных свойств трансмиссионных масел в их состав вводятся противоизносные, противозадирные, антиокислительные, антикоррозионные и другие присадки.

Пластические смазочные материалы широко используются для смазки подшипников качения и скольжения, шарнирных и шлицевых сопряжений, наконечников тяг рулевого управления и других узлов трения

машин. Учитывая то, что пластические смазки обладают нетекучестью, они используются для герметизации и уплотнения различных сопряжений.

Учитывая специфические условия работы, пластические смазочные материалы должны обладать высокими вязкостно-температурными и смазочными свойствами для снижения интенсивности изнашивания трущихся поверхностей сопряженных деталей. Кроме того, пластические смазочные материалы должны обладать высокой влагостойкостью, т.е. они не должны растворяться в воде, смываться, поглощать влагу в процессе эксплуатации машин.

Для улучшения свойств пластичных смазок применяют соответствующие присадки: противоизносные, противозадирные, антифрикционные, вязкостные и др. Кроме присадок в пластические смазочные материалы добавляют наполнители, обладающие низким коэффициентом трения (графит, тальк, оксиды цинка, меди, алюминия, бронзы и др.)

5.4. Влияние на изнашивание механических характеристик и структуры материалов

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. Эти связи и их разрыв приводят в конечном счете к разрушению микрообъемов поверхности 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 (способность материала сопротивляться разрушению поверхности детали при трении) металлов и сплавов оказывает влияние их твердость.

Твердостью называется свойство материала сопротивляться пластической деформации при вдавливании в его поверхность твердого тела (индентора). При измерении твердости в качестве индентора используют стальной закаленный шарик, алмазный конус или четырехгранную алмазную пирамиду.

Для чистых металлов и термически необработанных сталей зависимость между твердостью и относительной износостойкостью определяется выражением:

$$\varepsilon = bH, \quad (5.11)$$

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:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b'(H - H_0), \quad (5.12)$$

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.

При механической обработке заготовок деталей основное влияние оказывают силовые воздействия. В результате материал детали пластически деформируется, изменяется его структура и увеличивается плотность дислокаций. Образование дислокаций и измельчение зерен сопровождается повышением твердости поверхностного слоя, его упрочнением, которое характеризуется степенью и глубиной наклепа.

Степень наклепа определяется из выражения

$$\delta H = (H' - H) / H, \quad (5.13)$$

где H , H' – твердость поверхностного слоя до и после обработки детали.

При механической обработке в поверхностных слоях материала детали возникают остаточные напряжения, обусловленные тем, что недеформированные нижние слои материала препятствуют распространению деформаций верхних слоев. В результате в поверхностном слое возникают сжимающие, а в нижних – растягивающие остаточные напряжения.

На возникновение остаточных напряжений оказывает влияние и неравномерность нагрева слоев металла. При механической обработке поверхностный слой детали нагревается и увеличивается его объем. Ниже лежащие холодные слои препятствуют этому, в результате чего в поверхностном слое возникают напряжения растяжения, а в нижних – сжатия.

Структурно-фазовые превращения, возникающие при воздействии силовых и тепловых факторов в процессе обработки детали, предопреде-

ляют в конечном счете распределение остаточных напряжений в поверхностном слое (сжимающих $-\sigma$ или растягивающих $+\sigma$).

Существенное влияние на износостойкость оказывают структура и химический состав материалов. При изготовлении деталей машин чистые металлы имеют весьма ограниченное применение. В основном конструктивными материалами являются сплавы, которые получают сплавлением и спеканием двух или более металлов или металла с неметаллом (например, сталь – сплав железа с углеродом).

Для сплавов положительное влияние на повышение износостойкости оказывают мелкозернистая структура, наличие твердых структурных составляющих, наличие полезных примесей. Чем меньше действительное зерно стали, тем выше ее конструкционная прочность, предел выносливости и износостойкость. Чем крупнее зерно, тем более сталь склонна к закалочным трещинам и деформациям.

На механические свойства стали большое влияние оказывает количество углерода. С увеличением содержания углерода в стали повышается ее твердость $HВ$, пределы прочности σ_B и текучести σ_T , но снижается ударная вязкость $KС$ (рис. 5.6).

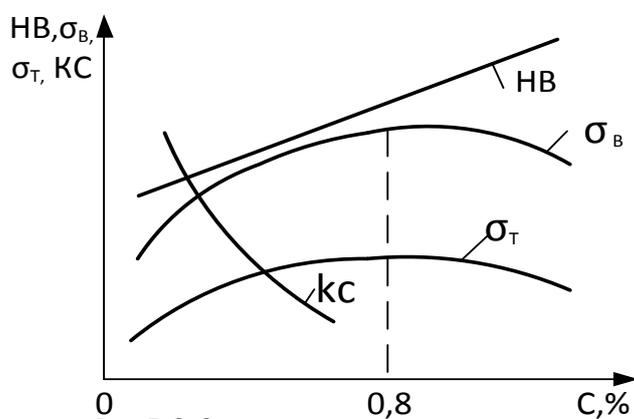


Рис.5.6. Зависимость некоторых механических свойств сталей от содержания углерода C

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, распо-

лагаясь в дефектных участках металла (раковинах, трещинах). Такие, включения, являясь концентратами 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 таком изнашивании определяется скоростью образования таких вторичных структур и их свойствами.

5.4. Влияние на изнашивание качества поверхности детали

Разрушение деталей, и прежде всего изнашивание, в большинстве случаев начинается с поверхности, так как поверхностные слои наиболее нагружены и подвержены воздействию внешней среды. Поэтому качество поверхностного слоя оказывает большое влияние на износостойкость детали.

Качество поверхности детали характеризуется физическими и геометрическими параметрами ее поверхностного слоя. Физические параметры поверхности (структура и твердость поверхностного слоя, остаточные напряжения в нем, глубина наклепа) рассмотрены в предыдущем разделе.

К важнейшим геометрическим параметрам качества поверхности относятся: макрогеометрия, шероховатость, волнистость и направление следов обработки.

Макрогеометрия характеризует различные отклонения формы реальной поверхности от номинальной, т.е. формы, заданной чертежом. К ним, прежде всего, следует отнести отклонения плоских и цилиндрических поверхностей.

Для цилиндрических поверхностей различают отклонения от круглости (овальность и огранка) и отклонения от профиля продольного сечения (конусообразность, бочкообразность и седлообразность).

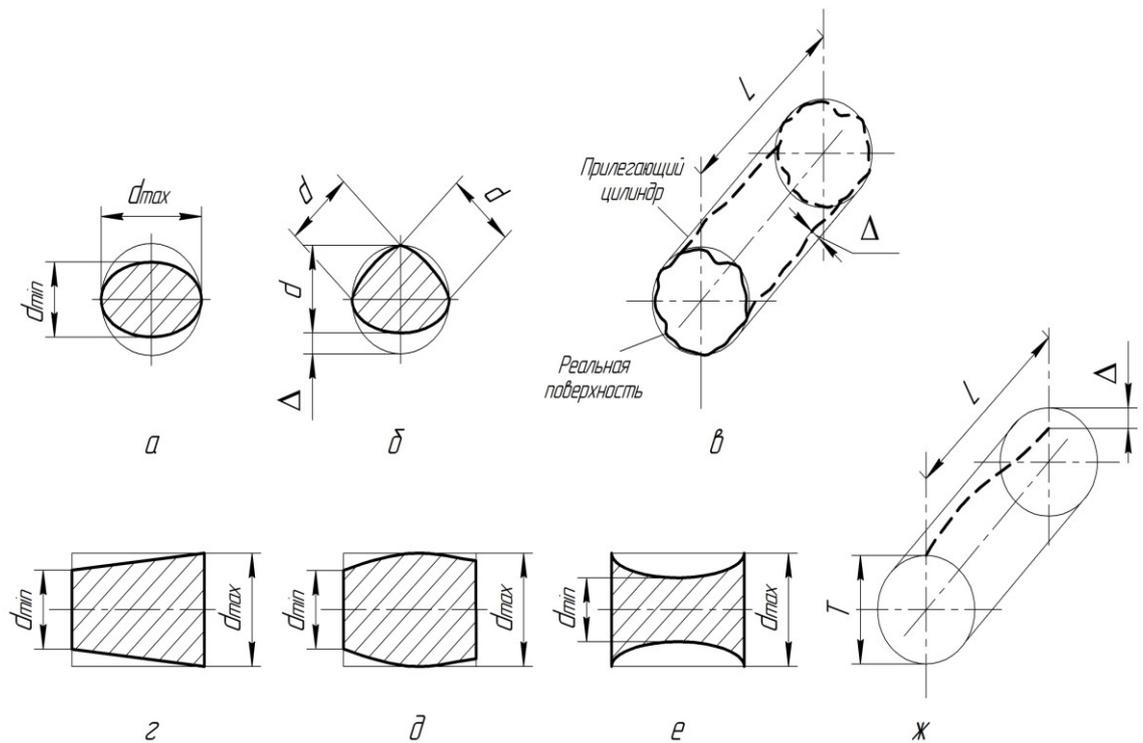


Рис.5.7. Отклонение формы цилиндрических поверхностей: а – овальность; б – огранка; в – конусообразность; бочкообразность; г – седлообразность

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, прецезионные элементы топливных насосов высокого давления и др.

Шероховатостью поверхности согласно ГОСТ 25142-82 называется совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами в пределах базовой длины L . Профилограмма поверхности трения представлена на рис.5.8.

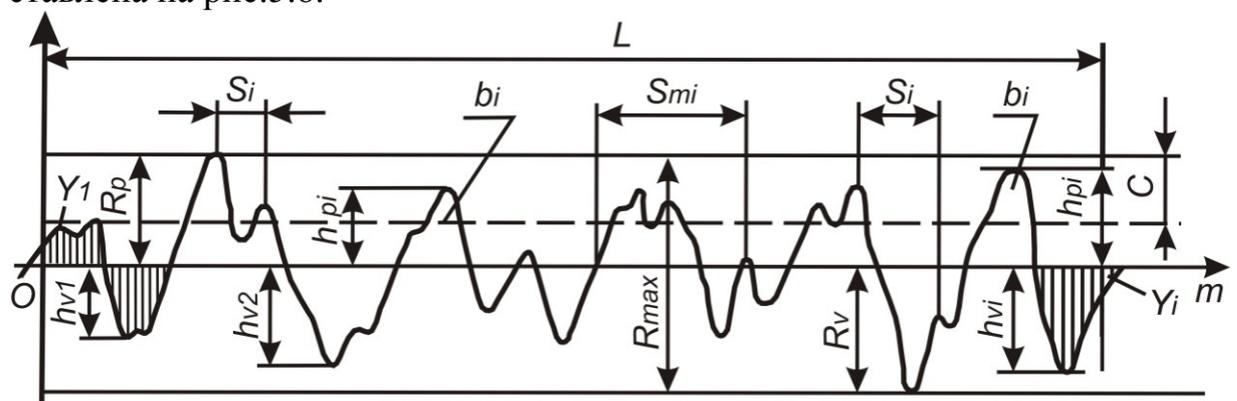


Рис.5.8.Профилограмма поверхности для определения шероховатости

При оценке шероховатости поверхности используется понятие базовой длины, по величине которой шероховатость количественно отличается от других видов неровностей – волнистости и макронеровности. Числовые значения шероховатости поверхности определяют от единой базы, за которую принята средняя линия профиля линии.

Средняя линия профиля m – это базовая линия, имеющая форму минимального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально.

Шероховатость поверхности изделий независимо от материала и способа изготовления оценивается следующими параметрами:

- *среднее арифметическое отклонение профиля* R_a – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (5.14)$$

где L – базовая длина; n – число выбранных точек профиля на базовой длине; y_i – расстояние между точкой профиля и средней линией m (отклонение профиля);

- *высота неровностей профиля по десяти точкам* R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших впадин профиля и глубин пяти наибольших выступов профиля в пределах базовой длины

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |h_{pi}| + \sum_{i=1}^5 h_{vi} \right], \quad (5.15)$$

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

$$R_{max} = R_p + R_v, \quad (5.16)$$

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

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} , \quad (5.17)$$

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

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i , \quad (5.18)$$

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

Волнистостью поверхности называют совокупность периодически повторяющихся неровностей у которых расстояния между смежными возвышенностями 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 к ее высоте.

При $S_w / h_w < 40$ 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.5.9):

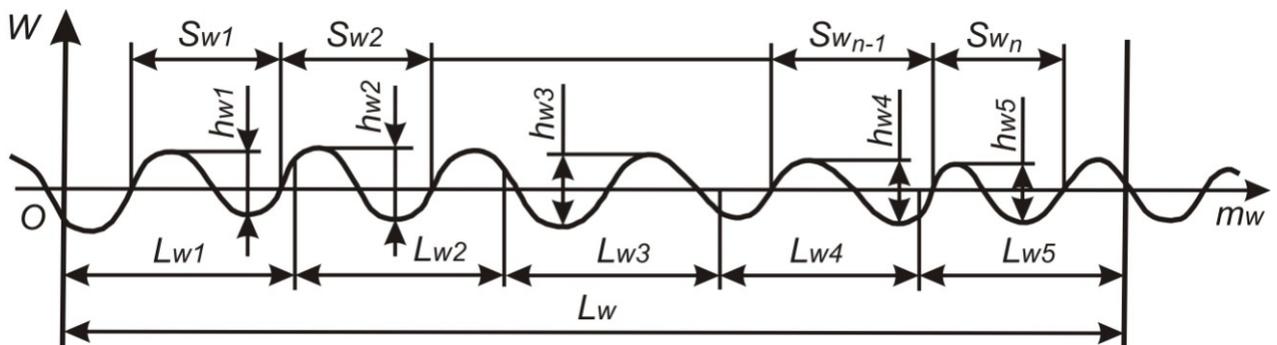


Рис.5.9. Профиллограмма поверхности для определения волнистости

- *высота волнистости* – среднее арифметическое пяти ее значений

$$h_{wi} = \frac{1}{5} (h_{w1} + h_{w2} + h_{w3} + h_{w4} + h_{w5}). \quad (5.19)$$

- *наибольшая высота волнистости* $h_{w \max}$ – расстояние между наивысшей и наименьшей 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

$$S_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{wi}. \quad (5.20)$$

Направление неровностей при обработке поверхности определяется кинематикой движения инструмента. В зависимости от способа обработки (точение, сверление, фрезерование, шлифование и др.) различают следующие виды направлений неровностей: параллельное, перпендикулярное, перекрещивающееся, произвольное, кругообразное и радикальное.

Высота микронеровностей рабочих поверхностей деталей зависит от большого числа факторов:

- обрабатываемого материала (поверхности из малоуглеродистых сталей имеют большую высоту микронеровностей по сравнению с высокоуглеродистыми);
- способа и режима обработки (поддачи, скорости и силы резания);
- материала режущего инструмента (обработка заготовок инструментом из твердого сплава обеспечивает менее шероховатую поверхность по сравнению с инструментом из быстрорежущей стали);
- жесткости технологической системы (вибрация элементов технологической системы, под воздействием которой изменяется положение режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой поверхности, приводит к образованию впадин и выступов).

Большое влияние на шероховатость поверхности оказывают заключительные операции обработки. Значения шероховатости для некоторых способов финишных операций обработки приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Способ обработки	R _a , мкм
Точение : - чистовое - тонкое	1,25 – 2,50 0,32 – 0,63
Фрезерование цилиндрической фрезой: - чистовое - тонкое	3,20 – 6,30 1,60
Развертывание: - чистовое - тонкое	0,63 – 1,25 0,32
Растачивание: - чистовое - тонкое	1,60 – 3,20 0,40 – 0,80
Шлифование круглое : - чистовое - тонкое	0,80 – 1,60 0,20 – 0,40
Шлифование плоское: - чистовое - тонкое	0,32 – 0,63 0,08 – 0,20
Хонингование: - чистовое - тонкое	0,10 – 0,32 0,05 – 0,20
Обкатка роликами и шариками	0,40 – 1,60

Шероховатость рабочих поверхностей оказывает существенное влияние на все их эксплуатационные свойства и, прежде всего, на износостойкость. Особенно сильно влияние шероховатости на интенсивность изнашивания проявляется в сопряжениях с зазором на стадии приработки. В процессе приработки таких сопряжений шероховатость изменяется как по размерам, так и по форме (рис. 5.10)

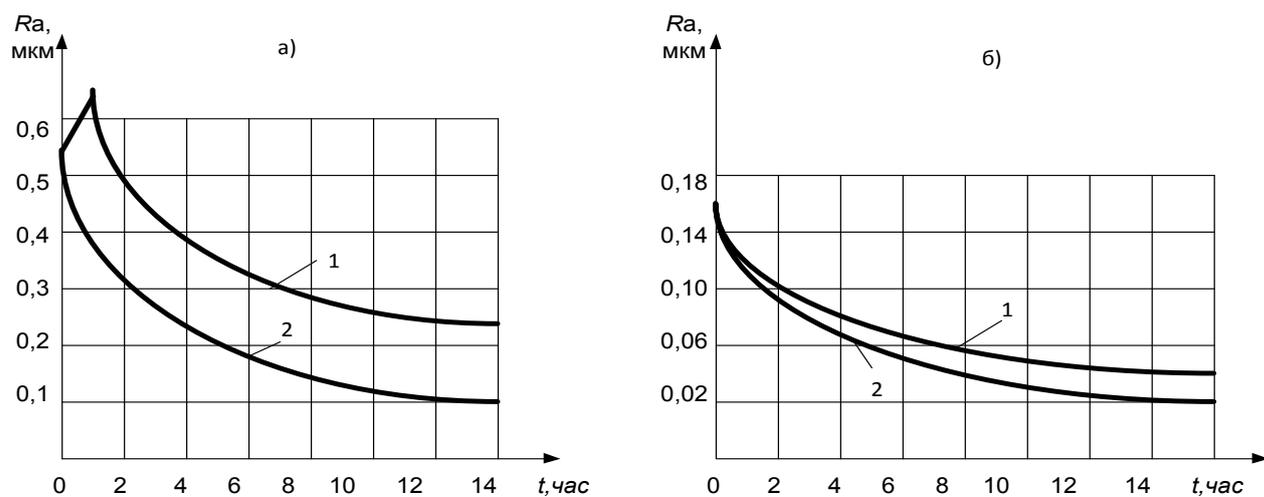


Рис. 5.10. Изменение шероховатости деталей цилиндро-поршневой группы в процессе обкатки двигателя: а – поршень; б – гильза цилиндров; R_a – параметр шероховатости; t – время обкатки

По окончании приработки, как видно из приведенных зависимостей, наступает период нормальной работы сопряжения, характеризующийся постоянством скорости изнашивания деталей (износ колец по характеру протекания процесса тот же).

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.

5.5. 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.

В соответствии со СНиП 2.05.02-95 по качеству дорожного покрытия автомобильные дороги в РФ делятся на пять групп:

Д₁ – цементобетон, асфальтобетон, брусчатка, мозаика;

Д₂ – битумоминеральные смеси (щебень или гравий, обработанные битумом);

Д₃ – щебень, гравий, обработанные вяжущими добавками, дегтебетоном;

Д₄ – булыжник, колотый камень, малопрочные каменные материалы, в том числе обработанные вяжущими добавками;

Д₅ – грунтовые дороги.

Естественно, чем ниже качество дорожного покрытия, тем выше интенсивность изнашивания трущихся 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/м³, а по грунтовым дорогам доходит до 6000 мг/м³. 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 на потерю ими работоспособности занимают 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 безот-

казность и долговечность. При этом эксплуатация транспортных машин по дорогам с большими неровностями существенно интенсифицируют эксплуатационные повреждения машин, включая и процессы изнашивания. Прежде всего это касается узлов и агрегатов автотранспортных средств, таких 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°C до $+15^{\circ}\text{C}$ (рис. 5.11).

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

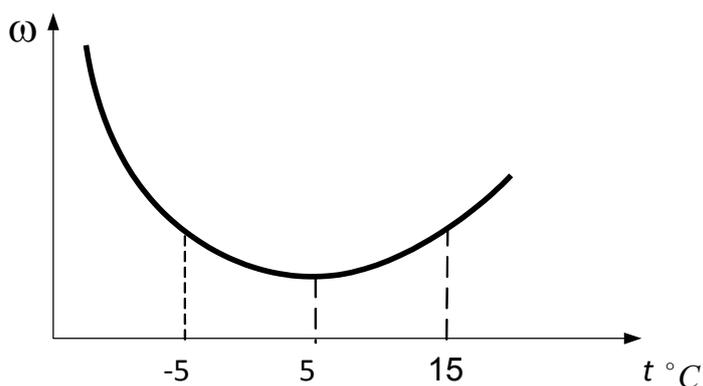


Рис. 5.11. Зависимость количества отказов автомобиля ω от температуры окружающего воздуха t $^{\circ}\text{C}$

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. Например, абразивное изнашивание цилиндро-поршневой группы двигателя в наибольшей степени проявляется в летних условиях, а коррозионно-механическое – в зимних. Поэтому летом необходимо принимать меры по предотвращению попадания в двигатель пыли, а зимой – следить за тепловым состоянием, не допускать переохлаждения.

Существенное влияние на интенсивность изнашивания деталей машин оказывают *эксплуатационные режимы их работы*. При движении автомобиля, например, 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.

Нестационарные режимы работы являются преувеличивающими при эксплуатации автомобилей и составляют 90 – 95 % в условиях городского интенсивного движения, 85 – 90 % при движении по грунтовым дорогам и 30 – 35 % на загородных автомагистралях от всего времени движения. Это приводит к увеличению интенсивности изнашивания деталей и сопряжений, существенному снижению ресурса. При нестационарных режимах работы двигателя, например, в сравнении с установившимися 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 двигателей при работе на неустановившихся режимах возрастает в 1,2 – 2 раза.

В этой связи при эксплуатации автомобиля большое значение имеет разработка рациональных методов вождения. Следует исключить при движении способ «разгон - накат», так как он приводит к увеличению изнашивания деталей двигателя и агрегатов трансмиссии. Это объясняется тем, что ухудшается качество смазки механических систем двигателя, возникают дополнительные циклические нагрузки в агрегатах трансмиссии (сцеплении, карданном валу, ведущем мосту).

Разновидностью неустановившегося режима работы автомобиля является режим принудительного холостого хода и торможения двигателем. В условиях городского движения эти режимы составляют от 5 до 20 % от общего времени движения автомобиля. Такой режим нередко используется при движении под уклон с включенной передачей. Подача топлива в цилиндры при этом соответствует режиму холостого хода при минимальных оборотах, а частота вращения коленчатого вала, обусловленная скоростью вращения колес автомобиля, увеличивается. В результате топливовоздушная смесь в цилиндрах обедняется, сгорание происходит с перебоями, и несгоревшее топливо частично выбрасывается в выпускную систему, а частично конденсируется, разжижая смазку и способствуя интенсифика-

ции изнашивания. Поэтому при вождении продолжительность работы двигателя на режиме принудительного холостого хода желательно по возможности сокращать.

Решающее влияние на показатели надежности двигателя оказывают нагрузочный и скоростной режимы его работы. Нагрузка при этом характеризуется величиной среднего эффективного давления в цилиндрах P_e , а скоростной режим – частотой вращения коленчатого вала двигателя n . С увеличением частоты вращения коленчатого вала при постоянной нагрузке P_e повышаются износы поверхностей трущихся деталей (рис. 5.12, а). Это связано с ростом инерционных сил, механических нагрузок на детали кривошипно-шатунного механизма и цилиндрико-поршневой группы, изменением теплового режима двигателя.

Из рис. 5.12, а очевидно, что с увеличением n возрастают износы деталей, причем наиболее интенсивный износ наблюдается в зоне больших оборотов коленчатого вала. В связи с этим эксплуатация двигателей на повышенных оборотах крайне нежелательна. Некоторый рост износов деталей при малых n связано со снижением давления в системе смазки двигателей, а, следовательно, 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. при увеличении подачи топливовоздушной смеси, интенсивность изнашивания деталей возрастает практически прямо пропорционально (рис. 5.12, б). Это связано с увеличением объема сгораемого топлива в цилиндрах и, как следствие, возрастанием механических нагрузок на детали цилиндрико-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма.

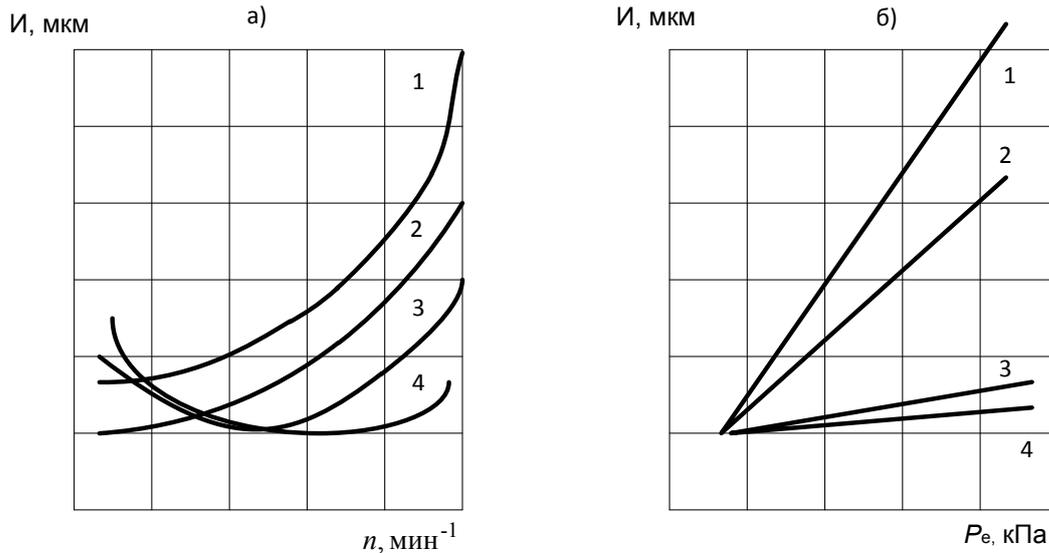


Рис. 5.12. Влияние частоты вращения коленчатого вала n и среднего эффективного давления P_e на интенсивность изнашивания деталей I двигателей ЗМЗ:
 а – при $P_e = \text{const}$; б – при $n = \text{const}$; 1 – цилиндры; 2 – поршневые кольца;
 3 – шейки коленчатого вала; 4 – стержни клапанов и направляющие втулки

Таким образом, повышенные скоростной и нагрузочный режимы приводят к увеличению интенсивности изнашивания деталей двигателя и снижению его ресурса. При этом, как следует из рис. 5.12, 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 увеличивает интенсивность изнашивания деталей.

Необходимым условием нормального изнашивания деталей является обеспечение оптимальных тепловых режимов их работы. При относительном перемещении контактирующих поверхностей в заданной среде с определенными скоростью и давлением в зоне трения закономерно изменяется температура, что влечет за собой изменение структуры поверхностного слоя, смазывающей способности масла, коэффициента трения и, как следствие - скорости изнашивания.

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

Применяемые топлива влияют на динамику процесса сгорания, условия смазывания поверхностей трения, интенсивность нагарообразования и другие параметры работы двигателя, предопределяющие вид и интенсивность изнашивания деталей.

Моторные масла, кроме разделения трущихся поверхностей и уменьшения сил трения, выполняют также функции отвода тепла в сопряжениях. В современных форсированных автомобильных двигателях масляная пленка подвергается воздействию высоких температур и давлений, что сопряжено с постоянной опасностью ее повреждения, ускорения процессов окисления, старения масла, образования нагара и лаков на деталях цилиндро-поршневой группы и закоксовывания колец.

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.

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 абразивного 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 возду-

ха, топлива и масла, исключить попадание неочищенного воздуха в двигатель, абразивных частиц в топливо и масло при хранении и заправке.

Для устранения усталостного изнашивания необходимо, чтобы нагрузки при трении качения, действующие на контактирующие поверхности (подшипников качения, зубчатых передач, кулачковых механизмов и др.), не превышали предела текучести.

Контрольные вопросы

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 вид трения и смазки?
4. Приведите наиболее важные эксплуатационные свойства жидких смазочных материалов.
5. Каким требованиям должны отвечать пластические смазочные материалы?
6. Какие механические характеристики в наибольшей степени оказывают влияние на процесс изнашивания?
7. Какими параметрами характеризуется качество поверхности детали?
8. Что понимается под шероховатостью поверхности детали и какими показателями она оценивается?
9. Как влияют режимы эксплуатации машин на процессы изнашивания?

6. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Для решения проблемы обеспечения высокого уровня надежности необходимы различные сведения об условиях работы конструктивных элементов машин, действующих на них нагрузках, характере и причинах возникновения отказов и неисправностей, а также показателях безотказ-

ности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Наличие такой информации является необходимым условием управления надежностью машин на всех стадиях их жизненного цикла и основой для разработки мероприятий по совершенствованию конструкций, технологическим процессам их изготовления и технической эксплуатации.

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

На начальной стадии создания автомобиля (проектирование) основным источником об уровне ожидаемой надежности являются результаты конструкторских расчетов и статистические данные об его аналогах. В настоящее время разработано достаточно много методик расчетов конструктивных элементов и их соединений на прочность, долговечность, износостойкость материалов, выносливость при различных режимах их нагружения. Так, например, проводятся прогнозные расчеты надежности валов и осей, зубчатых и червячных механизмов, подшипников скольжения и качения, разъемных и неразъемных соединений, уплотнительных элементов и др.

При прогнозном расчете и анализе показателей надежности узлов, агрегатов и машин в целом широко используется *метод структурных схем*. Сущность метода заключается в том, что выполняющие определенные функции конструктивные элементы системы или узла в результате их последовательного или параллельного соединения представляются в виде расчетной конструктивной схемы.

Последовательным называют схему соединения конструктивных элементов, при которой необходимым и достаточным условием нарушения работоспособности является отказ хотя бы одного из них (рис.6. 1,*a*). Нарботка до отказа системы при таком соединении равна наработке до отказа того элемента, у которого она окажется минимальной:

$$t_c = \min (t_i), i=1, 2, \dots, n, \quad (6.1)$$

где n – количество элементов системы.

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из n последовательно соединенных элементов, в соответствии с теоремой умножения независимых событий равна

$$P(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (6.2)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – вероятности безотказной работы элементов, входящих в систему, за наработку t .

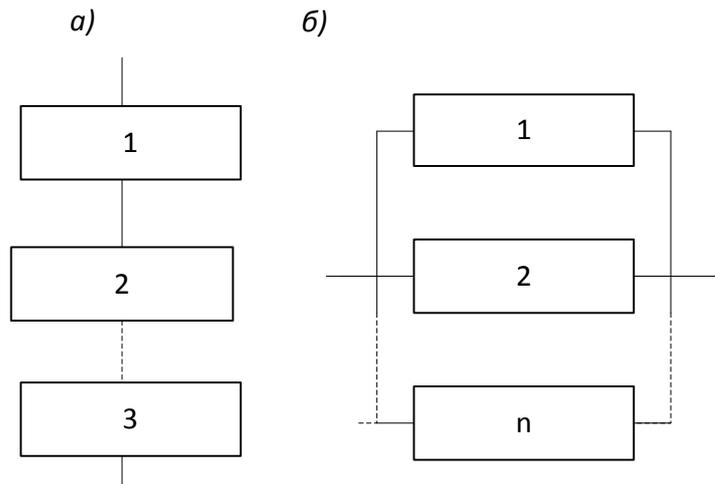


Рис. 6.1 Схема соединения конструктивных элементов: а – последовательное; б- параллельное

Параллельным называют схему соединения, работоспособность которой нарушается при отказе всех конструктивных элементов, входящих в нее (рис.6.1,б). Нарботка до отказа такой системы равна максимальному из значений наработок до отказа входящих в нее элементов

$$t_c = \max (t_i), i=1, 2, \dots, n. \quad (6.3)$$

Вероятность безотказной работы системы при параллельном соединении элементов составляет

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (6.4)$$

При расчете надежности проектируемое техническое устройство представляется в виде единой структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных соединений конструктивных элементов, выражающих при этом события их безотказности. В качестве примера

на рис. 6.2 и 6.3 показаны принципиальная (монтажная) и структурная схемы

Для оценки структурной надежности сборочных единиц машин необходимо иметь достоверные количественные характеристики надежности каждого входящего в них элемента. Такие характеристики получают в основном по результатам различных видов испытаний или эксплуатационных наблюдений.

6.1. Цель и виды испытаний изделий машиностроения

Испытания на надежность являются обязательным и неотъемлемым элементом разработки и изготовления машин. Высокого качества невозможно достичь без проведения всесторонних испытаний агрегатов, узлов, отдельных деталей, а также создаваемой машины в целом. Испытания являются источником достоверных сведений о качестве автотранспортной техники на всех этапах ее жизненного цикла, начиная с разработки проекта и заканчивая утилизацией.

В соответствии с ГОСТ 16504 – 81 под испытаниями автотранспортных средств понимается экспериментальное определение значений параметров и показателей качества в процессе эксплуатации или при имитации их условий. Только объективная информация о фактических показателях надежности АТС, причинах и характере возникновения их отказов, деталях, лимитирующих надежность конструктивных элементов, может стать основой для разработки мероприятий по улучшению их качества.

Как видно из приведенной на рис. 6.4 схемы на начальной стадии создания автомобиля (проектирование и конструкторские расчеты) сведений о его надежности мало. По мере проведения самых различных испытаний объем информации постепенно возрастает и достигает максимума только после проведения эксплуатационных испытаний.

Таким образом, испытания на надежность - необходимый этап создания любой машины, тем более, что методы расчета при их проектировании развиваются и совершенствуются на основе информации, полученной при испытаниях и эксплуатации. 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. 6.5 схематично показаны результаты доводки узла, состоящего из четырех деталей. После проведения необходимых конструкторско-технологических мероприятий γ -процентные ресурсы всех деталей доведены до заданного γ -процентного ресурса проектируемого узла.

После начала серийного производства доводка изделий продолжается. На этом этапе она направлена на устранение тех недостатков, которые не были замечены на опытных образцах или возникли вследствие различного рода ошибок технологии серийного производства (ранние отказы). По мере увеличения наработки машин начинают проявляться более поздние отказы, характер и причины возникновения которых тщательно изучаются и проводятся соответствующие доводочные работы.

Исследовательские испытания применяются 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.

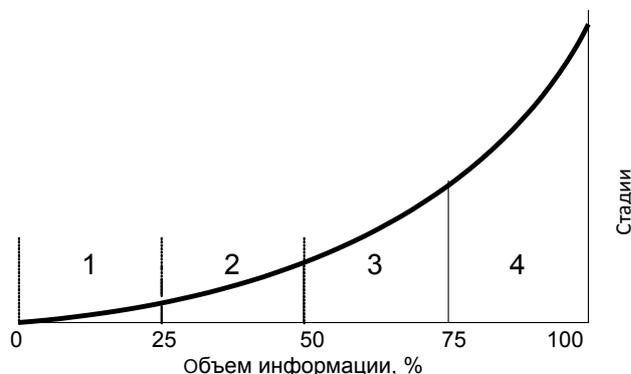


Рис. 6.4. Схема изменения объема информации о надежности изделия на стадиях:

- 1 - расчеты при проектировании;
- 2 - доводочные испытания;
- 3 - испытания серийной партии;
- 4 - эксплуатационные испытания

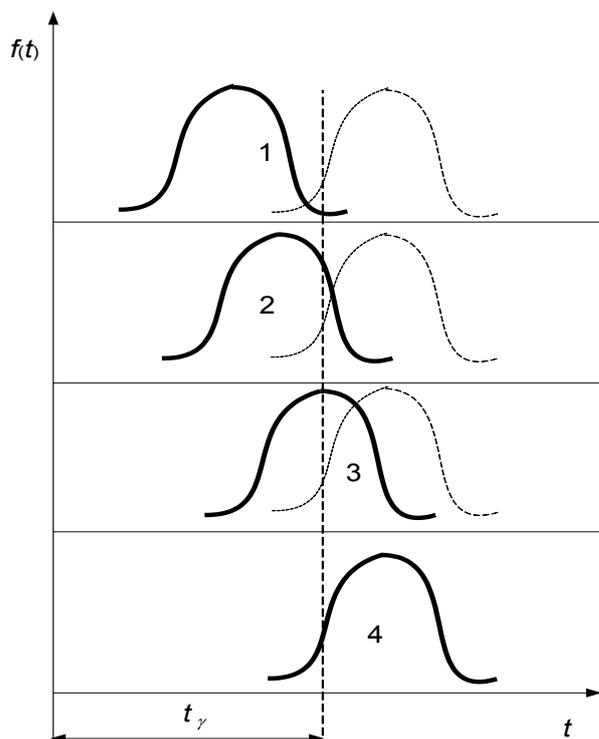


Рис. 6.5 Распределение ресурсов четырех деталей узла:

— - до доводочных испытаний;

---- - после доводки;

t_γ – заданный γ -процентный ресурс узла

Исследовательские испытания широко применяют при разработке новых моделей машин, совершенствовании серийно выпускаемых изделий, оценке новых материалов и технологических процессов, анализе влияния внешней среды на надежность и т.д.

Следует подчеркнуть особую роль исследовательских испытаний в постоянном совершенствовании типовых элементов машин. Если процесс доводки конструкций занимает сравнительно небольшие промежутки времени, ограниченные периодами подготовки машины к производству и ее серийного выпуска, то процесс совершенствования большой группы типовых деталей, узлов, агрегатов, проверенных

временем, продолжается практически весь период их эксплуатации. Множество постепенных улучшений приводят к созданию надежных типовых элементов машин, широко используемых при создании новых конструкций. По существу, это процесс тщательной доводки элементов машин, поэтому не всегда можно отделить доводочные испытания от исследовательских.

Доводочные и исследовательские испытания являются основой технического прогресса в машиностроении, так как они во многом определяют эффективность новой машины и ее потребительские свойства.

Приемочные испытания проводят с целью определения допустимости серийного производства изделий по показателям надежности, т.е. они являются барьером для задержки изделий, уровень надежности которых не в полной мере соответствует требованиям производства.

Квалификационные (установочные) испытания проводятся с целью проверки эффективности мероприятий по устранению дефектов, выявленных в процессе приемочных испытаний. Оценивается соответствие образцов установочной серии техническим условиям и другой нормативно-технической документации.

Контрольные испытания проводятся с целью оценки соответствия машин техническим условиям, стандартам и требованиям конструкторской документации. Проверяется стабильность качества изготовления, сборки, регулировок и пр. Проверяется надежность (безотказность) изделий в пределах определенной наработки (не менее гарантийной), а также эффективность конструкторских и технологических мероприятий, проведенных на производстве для устранения ранее выявленных при контроле недостатков.

6.2. Испытания автомобилей на надежность в процессе их эксплуатации

Наряду с испытаниями, проводимыми для подготовки машин к серийному производству (доводочные, приемочные, исследовательские и др.) обязательным этапом являются их испытания в процессе эксплуатации. Именно эксплуатация является главной проверкой, как надежности, так и функциональных свойств любых изделий машиностроения, выявляющей все недостатки, в том числе не проявившиеся при ранее выполненных испытаниях, а также при изготовлении.

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 автомобиля данной модели выносят на основании информации о надежности, изучаемую в процессе их эксплуатации.

Для автомобилей, как транспортных средств повышенной опасности, предъявляются 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*.

В свою очередь дорожные испытания подразделяются на:

- эксплуатационные;
- полигонные;

- специальные.

6.2.1. Эксплуатационные испытания

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 специалисты-испытатели не привлекаются.

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.

Основными задачами эксплуатационных испытаний являются:

- выявление характера и причин возникновения отказов в зависимости от наработки;
- определение коэффициентов готовности и использования;
- обоснование критериев предельного состояния деталей, узлов, агрегатов и, соответственно, их ресурсов;

- установление номенклатуры и норм расхода запасных частей;
- выявление деталей, лимитирующих надежность агрегатов;
- определение затрат на ТО и ремонты;
- изучение приспособленности автомобиля к проведению ТО и ремонта;
- разработка нормативов поддержания автомобилей в работоспособном состоянии.

В процессе таких испытаний неукоснительно выполняется инструкция по эксплуатации автомобилей, регистрируются простои и поломки. Все неисправности, отказы фиксируют с указанием их пробега до восстановления или замены с момента ввода автомобиля в эксплуатацию до КР или списания.

Однако, несмотря на все преимущества, эксплуатационные испытания обладают серьезным недостатком – большой длительностью. Если, например, ресурс автомобиля рассчитан на 400 – 450 тыс. км, и этот ресурс реализуется в течение 7 – 8 лет, то выход из строя даже агрегатов, имеющих пониженный ресурс, следует ожидать не ранее, чем через 3,5 – 4 года.

В связи с этим часто используется метод эксплуатационных испытаний на назначенной наработке. Например, можно отобрать в группу автомобили, имеющие к началу испытаний наработку 50 – 60 тыс. км, 70 – 80 тыс. км и т.д. При этом несложно обеспечить приемлемую численность выборки 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 за гарантийный, так и послегарантийный периоды их эксплуатации.

6.2.2. Полигонные испытания

Получение информации о надежности автомобильной техники, являющейся основой оценки их качества, требует все более увеличивающихся испытательных пробегов, затрат труда и что самое главное, длительного времени. В современных условиях для непрерывного совершенствования конструкций, быстрой смены моделей на более надежные требуются все более сжатые сроки.

Необходимость ускорения испытаний привела к развитию *полигонных испытаний* автомобилей и его агрегатов с целью оценки их возможного ресурса и ускоренного выявления слабых мест. Поэтому уже к началу 50-х годов прошлого столетия практически все крупные автомобилестроительные фирмы за рубежом располагали развитыми испытательными полигонами.

В отечественном автомобилестроении Центральный автополигон НАМИ был введен в эксплуатацию в 1964 г. и по своей оснащенности, объемам испытаний занял место одного из крупнейших в мире. Впоследствии, учитывая масштабы и содержание испытательной деятельности, полигон был преобразован в Научно-исследовательский центр по испытаниям и доводке автотехники – НИЦИАМТ.

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

Обобщение результатов испытаний показывает, что в большинстве случаев базовые детали автомобилей повреждаются не из-за недостаточной статистической прочности, а в результате накопления усталости в материале от переменных повторяющихся нагрузок. Зародившиеся первоначально усталостные микротрещины в материале под действием многих тысяч циклов переменных нагрузок развиваются в макротрещины и приводят к разрушению. Выявить показатели безотказности и долговечности тех или иных узлов, агрегатов или автомобиля в целом позволяют испытания на специальных дорогах полигона.

«Шашечная» испытательная дорога – дорога с неровной твердой поверхностью (булыжная или брусчатая, с неровностями в виде брусьев, уложенных поперек полотна) предназначена, в основном, для ускорения проверки долговечности деталей подвески, рамы и других деталей ходовой части, а также кузова. Основным размером профиля является высота отдельных неровностей, которая достигает 10 см. Общее количество неровностей на 1 км дороги – 1250. Испытания автотранспортных средств на таких дорогах сокращает их продолжительность по сравнению эксплуатационными примерно в 20 раз.

Испытательная дорога с косыми волнами предназначена для ускоренного испытания на долговечность узлов и деталей рулевого управления. Интенсивность воздействия на детали рулевого привода зависит от угла между направлением движения автомобиля и образующей профиля

неровности. При уменьшении угла интенсивность воздействия на детали рулевого управления возрастает. Для увеличения нагрузки на детали рулевого привода высоту неровностей (не более 7 см) располагают под углом 45° к оси дороги. При таком расположении неровностей достигаются нагрузки на детали рулевого управления в 3 – 5 раз большие, чем при движении по поперечно расположенным неровностям той же высоты.

Скоростная испытательная дорога с асфальтобетонным покрытием, с плавными поворотами и продольными профильными уклонами, характерными для скоростных автомагистралей, предназначена для ресурсных испытаний автомобилей и автопоездов. Движение по ним на максимальных и близких к ним скоростях позволяет в короткий срок оценить надежность таких агрегатов, как двигатель, 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.

Таким образом, в зависимости от целей испытаний, полигон НИЦИАМТ имеет весь набор специальных испытательных дорог для ускоренного получения необходимой информации о надежности автомобилей.

Полигонные испытания по сравнению с эксплуатационными позволяют существенно сократить их длительность (для деталей подвески в 3 – 5 раз, кабин – в 6 – 8 раз, рам – в 2 – 3 раза и т.д.). Длительность таких испытаний в зависимости от типа автомобилей представлена в табл. 6.1.

Из таблицы видно, что продолжительность ресурсных полигонных испытаний в 2 – 3, (а при форсированных – в 10 и более раз) меньше времени полного исчерпывания ресурса в эксплуатации.

На полигоне разработаны также методики проведения дорожных испытаний автомобилей, при которых их пробег равен ресурсу до капитального ремонта. Такие испытания при ресурсе, например, 300 тыс. км проводятся ускоренно в течение времени, немногим более полугода за счет непрерывной эксплуатации автомобиля несколькими экипажами.

Таблица 6.1

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

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

6.2.3. Специальные испытания

Специальные испытания автомобилей проводятся, как правило, при небольших пробегах на тех режимах движения и при той нагрузке, которые определяются целями таких испытаний. Если при эксплуатационных или полигонных испытаниях автомобиль оборудуется сравнительно небольшим количеством измерительной аппаратуры, то при проведении специальных испытаний для получения максимума информации о тех нагрузках, которые воздействуют на исследуемые агрегаты или детали, такой аппаратуры достаточно много (датчики, месдозы, акселерометры и т.д.).

Специальные испытания проводятся на обычных автомобильных дорогах и преследуют цель исследовать факторы, влияющие на надежность того или иного агрегата автомобиля. Протяженность таких испытаний составляет обычно от 60 до 80 км.

Данные специальных испытаний после обработки используются для воспроизведения эксплуатационных условий в стендовых испытаниях.

6.3. Стендовые испытания

Стендовые испытания агрегатов, узлов, отдельных деталей получают все большее развитие, постепенно заменяя при решении ряда технических вопросов дорожные испытания. Особенно возросло значение стендовых испытаний на долговечность и усталостную прочность различных элементов конструкции автомобилей.

Испытания на стендах отличаются от других видов испытаний (полигонных, эксплуатационных, специальных) высокой стабильностью задаваемых и поддерживаемых условий нагружения, температуры, влажности и других факторов, влияющих на функционирование конструкции, возможностями углубленных наблюдений за рабочими процессами, повышенной точностью их измерения и регистрации. На стендах может быть получена информация, которую не могут дать никакие иные испытания, например, кривые усталости, показатели прочности деталей и др.

Анализ эксплуатационных отказов показывает, что основными причинами, ограничивающими долговечность узлов и деталей автомобиля, является усталостное разрушение и изнашивание. Обычно эти процессы развиваются одновременно и взаимосвязано. Поэтому при проведении обычных эксплуатационных испытаний зачастую невозможно получить точные количественные оценки для выработки мероприятий по повышению усталостной прочности и износостойкости элементов до необходимых значений. В связи с этим целесообразнее испытывать отдельные сопряжения или детали, раздельно воспроизводя в стендовых условиях процессы изнашивания или усталостного разрушения.

На стендах испытываются все основные агрегаты, узлы и отдельные детали автотранспортных средств: двигатели, сцепления, коробки передач, карданные передачи, рулевые управления, ведущие мосты, рамы, кузова, кабины, подвески, шины, колеса, ступицы и др. Для таких испытаний используются различные стенды индивидуального изготовления или серийно выпускаемые специализированными предприятиями. На рис. 6.6 показана схема современной испытательной машины фирмы «Шенк», на которой одновременно испытываются четыре карданных вала. В подобных стендах условия испытаний максимально приближены к условиям эксплуатации, так как обеспечивается возможность управления процессом по специальным программам. Одновременно обеспечиваются минимальные затраты энергии, подводимой к стенду, благодаря замкнутости силовых контуров.

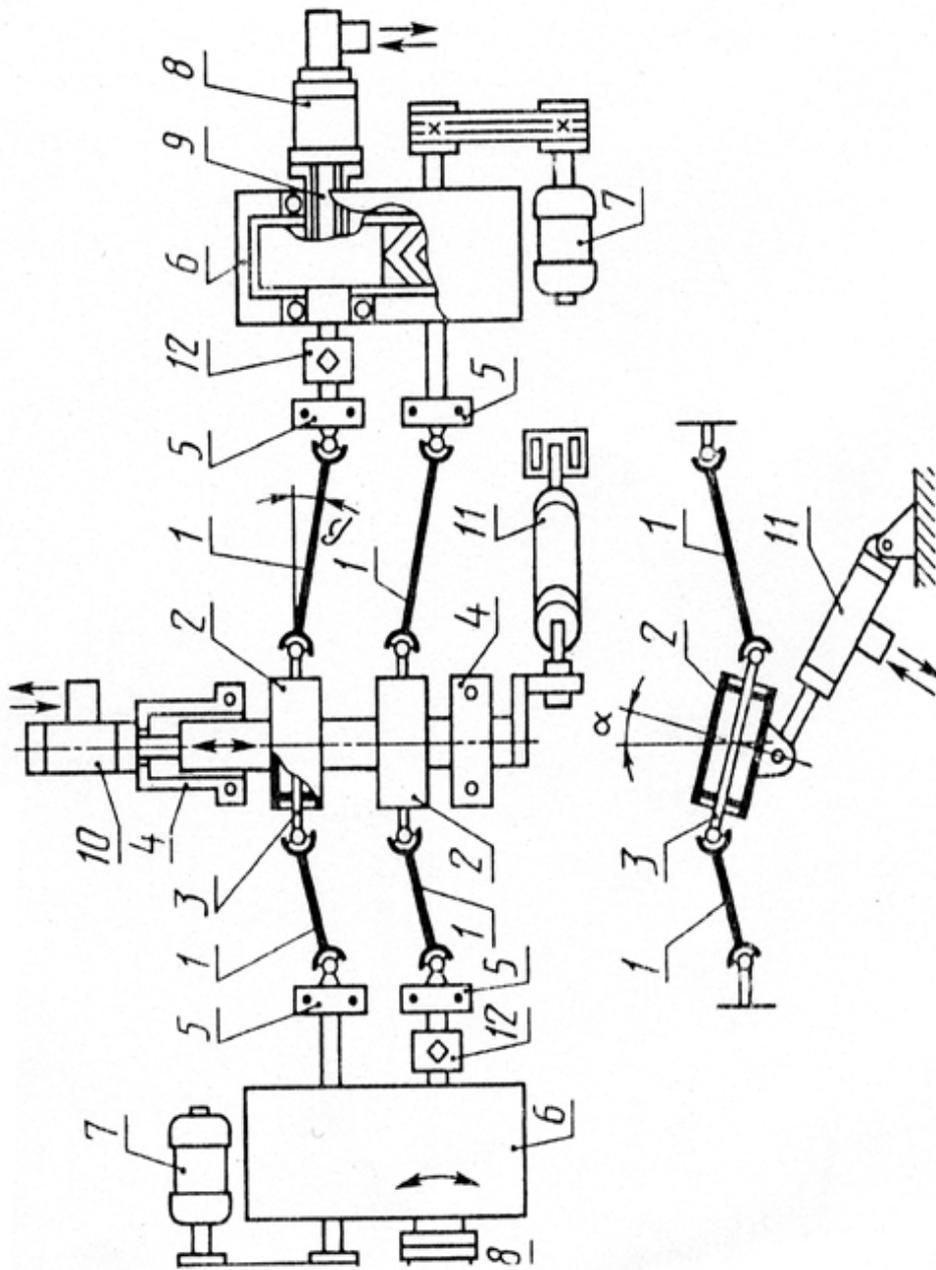


Рис. 6 б Схема стенда для испытаний карданных валов с программным регулированием вращательных нагрузок, а также вертикальных и горизонтальных углов передачи момента:

- 1 – испытываемые валы; 2 – обоймы промежуточных валов; 3 – промежуточные валы; 4 – подшипники цапфы обойм промежуточных валов; 5 – захватные опоры; 6 – зубчатые передачи; 7 – привод вращения; 8 – статор поворотных гидроцилиндров нагружения в контуре; 9 – вал ротора поворотного гидроцилиндра; 10 – гидроцилиндр возвратно-поступательного движения для имитации относительного перемещения кузова и моста; 11 – гидроцилиндр имитации поворотов управляемых колес; 12 – динамометры

Кроме испытаний агрегатов автомобилей большое распространение получили стендовые испытания отдельных сборочных единиц и узлов в целях экспериментальной отработки элементов конструкций и со-

пряжений, для которых практически невозможно установить параметры надежности расчетным путем. Схемы стендов для испытаний некоторых сборочных единиц представлены на рис. 6.7.

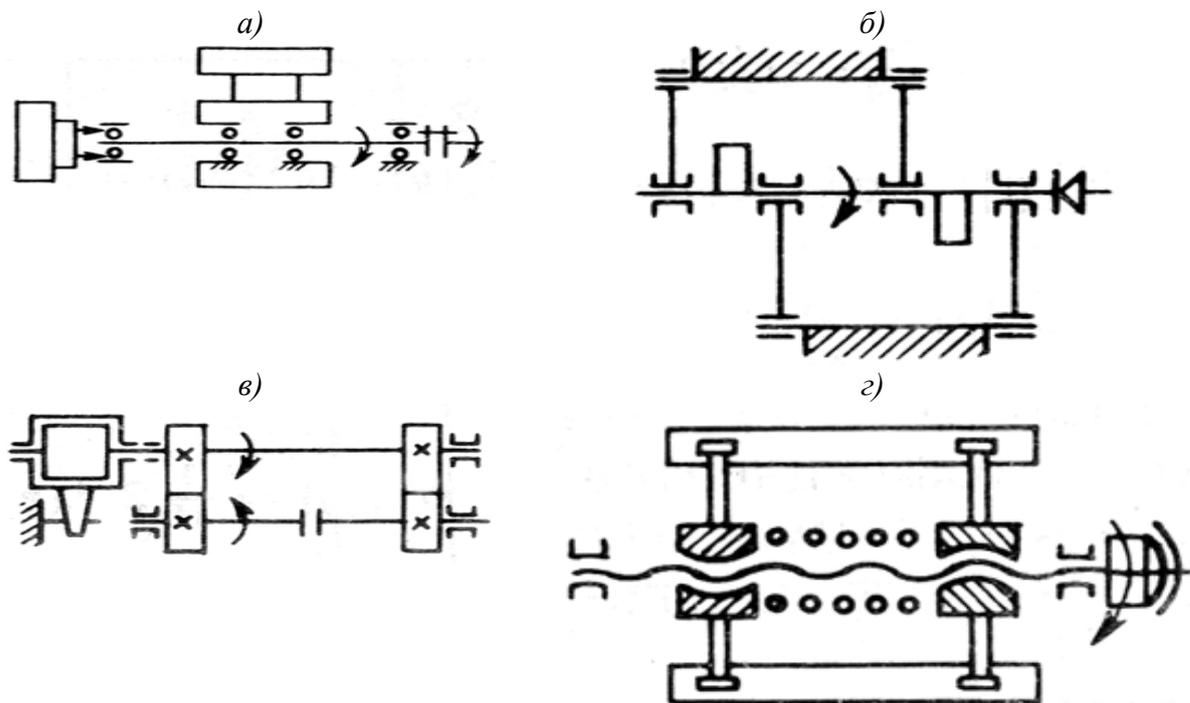


Рис. 6.7. Схемы стендов для испытаний сборочных единиц (узлов):
 а – подшипников качения; б - коленчатых валов с коренными и шатунными подшипниками; в - зубчатых передач; г - ходовой пары винт-гайка

6.4. Ускоренные испытания

Для сокращения сроков освоения новых моделей автомобилей и экономии средств, идущих на испытания, огромное значение приобретает проблема ускорения испытаний на надежность.

Длительность испытаний изделий определяется отрезком времени от начала постановки их на место проведения до момента, когда полученная информация становится достаточной для 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 большее сокращение длительности достигается при стендовых испытаниях, но преимущественно по отдельным агрегатам, узлам, деталям. Эффективность этих испытаний проявляется на этапе доводки конструкции. Основными факторами ускорения стендовых испытаний являются: непрерывность процесса нагружения, одновременное испытание возможно большего числа изделий, сокращение простоев и т.д.

Кроме этого ускорение испытаний может быть достигнуто за счет повышения точности измерения выходных параметров. При износных отказах, например, не всегда в процессе испытаний необходимо доводить износ детали до предельного состояния. Часто достаточно знать скорость процесса изнашивания, если дальнейшее его протекание во времени определяется известными закономерностями.

Такие методы, например, как метод радиоактивных изотопов, измерения 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.

По методике НАМИ при ресурсных испытаниях сцеплений используется следующая методика. Автопоезд с полной нагрузкой устанавливается на подъеме 8 %, затем осуществляется 10 троганий с места на второй передаче с интервалом 30 секунд. В течение 15 минут сцепление охлажда-

ется, и цикл повторяется. За 6 циклов (60 троганий с места) накладки сцеплений достигают предельного состояния.

При форсировании коррозионных процессов испытания проводятся в коррозионных камерах по специальной методике, предусматривающей следующие этапы:

- подготовка кузова (проверка качества и толщины лакокрасочного покрытия, нанесение искусственных очагов коррозии);

- проведение ежедневных циклов испытаний, состоящих из выдержки автомобиля в камере в течение 6 ч, проезда через ванну, заполненную 5 %-ным соевым раствором на глубину 100 мм, проезда по пыльным дорогам.

Такие испытания позволяют в короткие сроки оценить эффективность конструкторских и технологических мероприятий по защите автомобилей от воздействия коррозии и разработать методы по повышению коррозионной стойкости кузовов. На рис. 6.8 показан характерный пример результатов наблюдений за развитием коррозионного повреждения по ширине каверны при испытаниях по приведенной методике.

Как видно из графика распространение коррозионного повреждения в зависимости от количества циклов испытаний носит такой же линейный характер, как и в условиях реальной эксплуатации в зависимости от времени.

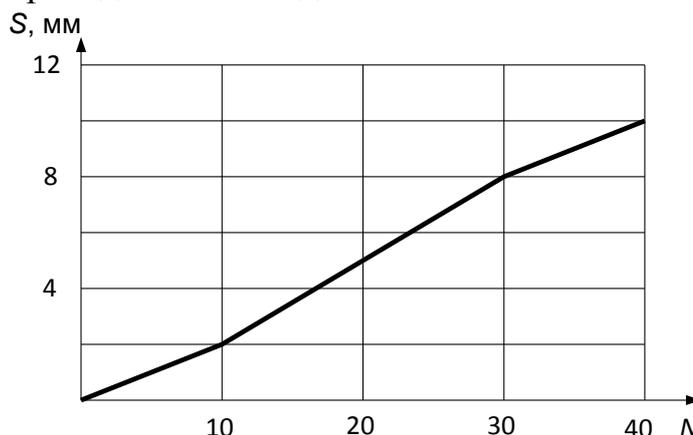


Рис. 6.8 Распространение подпленочной коррозии в каверне на передних дверях легкового автомобиля:
N - число циклов испытаний; S - ширина распространения, мм

Абразивное воздействие на трущиеся поверхности деталей используют для существенного сокращения длительности ресурсных испытаний.

Абразивные частицы попадают к трущимся поверхностям, в основном, с воздухом в виде частиц пыли. Запыленность воздуха является также одной из основных причин загрязнения топлива и масла.

Среди различных видов изнашивания преобладающее значение для автомобильных конструкций имеет абразивное, причем абразивная состав-

ляющая в общем эксплуатационном износе, например, деталей двигателя для условий средней полосы России достигает 80 %.

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 величиной запыленности воздуха.

Наиболее уязвимым от абразивного изнашивания при работе автомобиля в запыленной среде является двигатель. Интенсивность или скорость его абразивного повреждения определяется износом цилиндров по наработке. Нормативно-технической документацией на различные модели двигателей устанавливаются предельный износ гильз цилиндров и соответствующий пробег для первой категории условий эксплуатации. Для ряда двигателей отечественного производства результаты испытаний представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Модель двигателя	Наименование показателей			
	Нормативный ресурс двигателя, тыс. км	Предельный износ цилиндров, мкм	Интенсивность форсированного изнашивания цилиндров, мкм/1000 км	Суммарная продолжительность испытаний за ресурсный пробег, ч
ВАЗ-2121	100	150	1,58	48
ЗМЗ-24	200	300	0,76	22,6
ЗМЗ-53	200	300	0,49	39,1
ЗИЛ-130	200	350	-	-
ЯМЗ-236, ЯМЗ-238	300	350	1,75	13,4
КамАЗ-740	300	350	0,78	17,7

Форсированные испытания автомобилей существенно сокращают длительность получения информации о надежности даже по сравнению с полигонными (табл. 6.1). Следует, однако, отметить, что предельные значения параметров форсирования должны выбираться из условия сохранения физической сущности процесса, из-за которого автомобиль теряет

свою работоспособность, т.е. чтобы вид и характер разрушения при работе на повышенных режимах был идентичен виду и характеру разрушения при нормальных условиях эксплуатации.

Эффективность того или иного метода сокращения длительности испытаний характеризуется коэффициентом ускорения

$$K_y = \frac{T_{\text{э}}}{T_y},$$

где $T_{\text{э}}$, T_y – продолжительность эксплуатационных и ускоренных испытаний соответственно.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы получения информации о надежности машин.
2. Раскройте сущность метода структурных схем при расчете надежности изделий.
3. Какие задачи решаются при испытаниях машин?
4. Перечислите основные виды испытаний машин на надежность.
5. Какие характеристики надежности автомобилей получают при эксплуатационных испытаниях?
6. С какой целью используются полигонные испытания?
7. Какую информацию о надежности получают при стендовых испытаниях?
8. Назовите основные методы и способы ускорения испытаний.

7. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН

7.1. Определение объема выборки обследований

Без объективной информации о надежности невозможно определить ее фактические показатели, выявить недостатки проектирования и производства изделия, установить влияние на надежность условий эксплуатации.

Такая информация поступает для анализа и обработки по результатам самых разнообразных испытаний (стендовых, полигонных, эксплуатационных, специальных и т.д.).

Наиболее полную информацию о надежности автомобилей и его элементов, как уже отмечалось, дают эксплуатационные испытания. Подконтрольные автомобили при таких испытаниях подбираются в группы, которые характеризуются однородностью своего возрастного состава и однородностью условий эксплуатации. Однако, как показывает 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 испытываемых объектов. Естественно, при увеличении числа испытываемых 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 распространенным методом определения представительной выборки испытаний является метод доверительных интервалов, который заключается в следующем. По предварительным выборочным характеристикам случайной величины (например, среднего ресурса \bar{t}_{cp}) определяют верхнюю t_b и нижнюю t_n доверительные границы (рис. 4.1). Эти границы и определяют доверительный интервал, который с некоторой доверительной вероятностью α накрывает значение \bar{t}_{cp} , т.е.

$$\alpha = P(t_n \leq \bar{t}_{cp} \leq t_b).$$

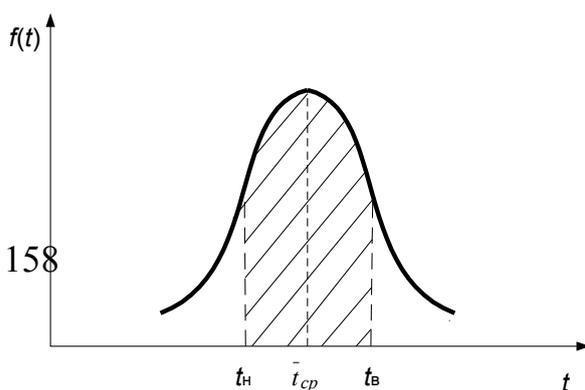


Рис. 4.1. Распределение случайной величины t с доверительными границами

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:

$$t_{\text{н}} = \bar{t}_{\text{cp}} - t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad (4.1)$$

$$t_{\text{в}} = \bar{t}_{\text{cp}} + t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (4.2)$$

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, находится по формуле

$$N = U_p^2 \sigma^2 / \varepsilon^2, \quad (4.3)$$

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

$$\varepsilon = \delta \bar{t}_{\text{cp}}, \quad (4.4)$$

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

Подставляя значение ε в формулу (4.3), получим выражение для минимально необходимого объема выборки:

$$N = \frac{U_p^2 \sigma^2}{(\delta \bar{t}_{\text{cp}})^2}. \quad (4.5)$$

Пример. При наблюдении за 9 автомобилями были получены следующие наработки t_i (тыс. км) до предельного состояния выпускного клапана двигателя ЗМЗ4063.10: $t_1 = 90$; $t_2 = 105$; $t_3 = 125$; $t_4 = t_5 = 140$; $t_6 = 170$; $t_7 = 185$; $t_8 = 210$; $t_9 = 230$. Требуется определить необходимый объем выборки обследования с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и относительной погрешностью $\delta = 10 \%$.

1. Вычисляем среднее арифметическое значение наработки выпускного клапана \bar{t}_{cp} до предельного состояния и среднее квадратическое отклонение

$$\bar{t}_{cp} = \frac{1}{N} \sum_1^9 t_i = \frac{1}{9} (90 + 105 + \dots + 230) = 171,9 \text{ тыс. км};$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (t_i - \bar{t}_{cp})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{(90-171,9)^2 + (105-171,9)^2 + \dots + (230-171,9)^2}{9-1}} =$$

$$= 50,5 \text{ тыс. км.}$$

2. Определяем значение вспомогательной величины U_p . При заданной доверительной вероятности $\alpha = 0,95$

$$\alpha^* = \frac{1+\alpha}{2} = \frac{1+0,95}{2} = 0,975.$$

По таблице квантилей нормального распределения для $\alpha^* = 0,975$ величина $U_p = 1,96$.

3. При относительной погрешности $\delta = 10 \%$ минимально необходимый объем выборки составит

$$N = \frac{U_p^2 \sigma^2}{(\delta \bar{t}_{cp})^2} = \frac{1,96^2 \cdot 50,5^2}{(0,1 \cdot 171,9)^2} = 33 \text{ ед.}$$

Если ужесточить величину относительной погрешности при оценке \bar{t}_{cp} , например до 5 %, то необходимый объем выборки для нашего примера составит

$$N = \frac{1,96^2 \cdot 50,5^2}{(0,05 \cdot 171,9)^2} = 52 \text{ ед.}$$

Таким образом, метод доверительных интервалов позволяет с необходимой точностью и заданной доверительной вероятностью определить представительный объем выборки обследований. Необходимым условием при этом, как уже отмечалось, является знание закона распределения ис-

комой характеристики. При неизвестном законе может быть использована ориентировочная формула определения объема выборки

$$N = \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln(1-\delta)}. \quad (4.6)$$

Для нашего примера при уровне доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и допустимой относительной ошибке $\delta = 5\%$ необходимый объем выборки составит

$$N = \frac{\ln(1-0,95)}{\ln(1-0,05)} \approx 58 \text{ ед.}$$

4.2. Определение выборочных характеристик

Для оценки случайной однородной величины используются два вида характеристик: полные и числовые. Полные характеристики – это так называемые *законы распределения*. Для дискретных величин в качестве таковых используют *функцию и ряд распределения* (графически - многоугольник распределения), для непрерывных величин – *функцию и плотность распределения* (графически – кривую распределения).

Любой закон распределения представляет собой некоторую функцию, которая полностью описывает случайную величину. Однако, в целом ряде инженерных задач нет необходимости характеризовать случайную величину полностью, исчерпывающим образом. Зачастую вполне достаточно определить отдельные параметры, характеризующие наиболее существенные черты распределения случайной величины. Такие характеристики, назначение которых – выразить в сжатой форме наиболее существенные особенности распределения, называются числовыми характеристиками случайной величины.

4.2.1. Числовые характеристики случайной величины

Основными числовыми характеристиками случайной величины являются: среднее арифметическое (выборочное среднее), среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Среднее арифметическое случайной величины характеризует центр группирования всей совокупности ее значений:

$$\bar{X} = (X_1 m_1 + X_2 m_2 + \dots + X_k m_k) / n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i m_i, \quad (4.7)$$

где X_i – центр i -го интервала вариационного ряда; m_i – соответствующая данному интервалу частота; k – количество интервалов вариационного ряда; n – объем выборки обследования.

Среднее квадратическое отклонение случайной величины $\sigma(x)$, характеризующее меру рассеивания значений X вокруг центра группирования \bar{X} , определяется по формуле

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 m_i}{n - 1}}. \quad (4.8)$$

Коэффициент вариации ряда v оценивает относительную меру рассеивания случайной величины X и в первом приближении позволяет судить о законе ее распределения

$$v = \frac{\sigma(x)}{\bar{X}}. \quad (4.9)$$

Чем меньше значение коэффициента вариации, тем плотнее группируются результаты испытаний вокруг среднего значения \bar{X} , тем, следовательно, меньше их рассеивание.

4.2.2. 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 функции распределения случайной величины (законы распределения) $F(X)$ и $P(X)$. Для автотранспортной техники в качестве случайной величины чаще всего используют наработки t (до 1 отказа, между отказами, до предельного состояния и т.д.). Поэтому при обработке результатов испытаний различными законами вместо абстрактной случайной величины X используем наработку t .

Интегральная функция распределения $F(t)$ показывает вероятность того, что наработка T от начала отсчета до появления отказа окажется меньше заданной наработки 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 $P(t)$ показывает вероятность того, что наработка T от начала отсчета до появления отказа окажется больше 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 $F(t)$ и $P(t)$ определяются из выражений

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt; \quad P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t), \quad (4.10)$$

где $f(t)$ – дифференциальная функция распределения. Она характеризует плотность, с которой распределяются значения случайной величины в данной точке и поэтому называется плотностью распределения случайной величины.

Физический смысл $f(t)$ применительно к теории надежности – это вероятность возникновения отказа на достаточной малой наработке.

Таким образом, функции или законы распределения устанавливают связи между возможными значениями случайных величин и соответствующими им вероятностями.

Если известна одна из функций $F(t)$, $P(t)$ или $f(t)$, можно определить любую числовую характеристику надежности. Например, средняя наработка до отказа находится из выражений:

$$t_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt \quad \text{или} \quad t_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (4.11)$$

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 называется распределенной по экспоненциальному закону, если ее плотность вероятности определяется выражением:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{при} \quad t \geq 0, \quad (4.12)$$

где λ – параметр закона распределения; t – случайная величина наработки.

При исследовании надежности машин параметр λ может выражать, например, интенсивность отказов, или интенсивность их восстановления.

В общем случае экспоненциальным распределением описываются события, которые возникают с постоянной интенсивностью ($\lambda = \text{const}$) и

независимо друг от друга (наработки деталей с внезапным характером отказов, трудоемкости их устранения, интервалы времени между поступлениями автомобилей в зону ремонта).

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $F(t)$ на интервале наработки от 0 до t вычисляются из выражений:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (4.13)$$

Средняя наработка до отказа (средний ресурс, средний срок службы, средний срок сохраняемости, среднее время восстановления отказа):

$$t_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.14)$$

Среднее квадратическое отклонение для экспоненциального закона распределения:

$$\sigma = t_{\text{cp}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.15)$$

Коэффициент вариации:

$$\nu = \frac{\sigma}{t_{\text{cp}}} = 1. \quad (4.16)$$

Гамма-процентный ресурс (гамма-процентный срок службы, гамма-процентный срок сохраняемости) находится из выражения:

$$t_{\gamma} = \frac{1}{\lambda} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right). \quad (4.17)$$

Из выражений (4.12) и (4.13) следует, что интенсивность отказов λ может быть выражена формулой:

$$\lambda = \frac{f(t)}{e^{-\lambda t}} = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (4.18)$$

Нормальный закон распределения

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

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.19)$$

где t_{cp} , σ – параметры нормального распределения (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение).

Параметр t_{cp} характеризует положение распределения на оси абсцисс, а параметр σ форму кривой (рис. 4.2).

Для упрощения вычислений при решении практических задач надежности 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 распределение случайной величины z :

$$f_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}, \quad (4.20)$$

Функция $f_0(z)$ является однопараметрической и ее значения приведены в таблицах нормального распределения. При отрицательных значениях z функция $f(-z) = f(z)$. После того, как найдены значения $f_0(z)$ необходимо перейти обратно к функции $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} f_0\left(\frac{t - t_{cp}}{\sigma}\right). \quad (4.21)$$

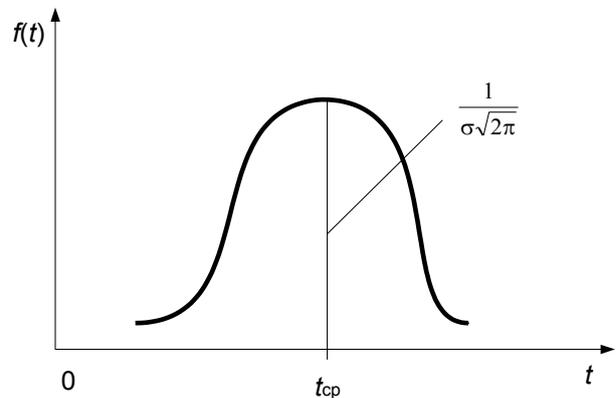


Рис. 4.2. Нормальное распределение с параметрами t_{cp} и σ

Вероятность безотказной работы до возникновения первого отказа вычисляется из выражения

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{cp}}{\sigma}\right), \quad (4.22)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ - функция Лапласа, значения которой приведены в таблицах математической статистики. Эта функция нечетная, т.е. при $\Phi(-z) = -\Phi(z)$.

Вероятность отказа определяется по формуле

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{cp}}{\sigma}\right). \quad (4.23)$$

Интенсивность отказов находится по известной формуле:

$$\lambda = f(t)/P(t).$$

Гамма-процентный ресурс (гамма-процентный срок службы, гамма-процентный срок сохраняемости) определяется из уравнения

$$\frac{\gamma}{100} = 0,5 - \Phi\left(\frac{t_\gamma - \bar{t}_{\text{ср.}}}{\sigma}\right). \quad (4.24)$$

Нормальный закон распределения хорошо описывает процессы, на которые влияют большое число независимых факторов, каждый из которых оказывает незначительное воздействие. Ему подчиняются износные отказы, ресурсы агрегатов и отдельных деталей, люфты и зазоры в сочленениях, трудоемкости обслуживания и др.

Логарифмически-нормальное распределение

Непрерывная случайная величина t называется распределенной по логарифмически-нормальному закону, если логарифм этой величины распределяется по нормальному закону. Плотность распределения имеет вид:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_{\text{л}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - y_0)^2}{2\sigma_{\text{л}}^2}}, \quad (4.25)$$

где y_0 – математическое ожидание логарифма случайной величины; $\sigma_{\text{л}}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма случайной величины.

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

$$t_{\text{ср}} = e^{y_0 + \frac{\sigma^2}{2}}; \quad (4.26)$$

$$\sigma = \sqrt{e^{2y_0 + \sigma_{\text{л}}^2} (e^{\sigma_{\text{л}}^2} - 1)}. \quad (4.27)$$

При решении практических задач определения показателей надежности автомобилей плотность распределения вероятности логарифма t определяется по формуле:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_{\text{л}}} f_0\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right), \quad (4.28)$$

где $f_0(z)$ – плотность вероятности нормированного распределения.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа находятся из выражений:

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right), \quad (4.29)$$

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right). \quad (4.30)$$

Интенсивность отказов (или восстановлений) определяется по формуле (4.18).

Гамма-процентный ресурс (срок службы, сохраняемости) находится из уравнения:

$$\frac{\gamma}{100} = 0,5 - 0,5\Phi\left(\frac{\ln t_{\gamma} - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right). \quad (4.31)$$

Логарифмически-нормальное распределение хорошо описывает отказы подшипников передних колес, усталостное разрушение деталей при стендовых испытаниях, периодичности крепежных работ и др.

Распределение Вейбулла

Непрерывная случайная величина t называется распределенной по закону Вейбулла, если ее плотность распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \text{ при } t > 0 \quad (4.32)$$

где a – параметр масштаба распределения, характеризующий растянутость кривых вдоль оси t ; b – параметр формы распределения.

Значения плотностей вероятностей $f(t)$, записанные по этой форме, протабулированы, т.е. представлены в таблицах математической статистики.

Распределение Вейбулла – гибкое распределение и часто принимается в качестве статистической модели для описания самых разнообразных отказов. Хорошо оно проявляется в модели «слабого звена». Например, в двигателе, кроме блока цилиндров, картера, коленчатого вала, поршней, шатунов входят менее долговечные детали: поршневые кольца, вкладыши, прокладки, уплотнения и т.д. Они отказывают в разные сроки, а наработка двигателя на отказ определяется наиболее слабым звеном.

Поэтому распределение Вейбулла занимает особое место при оценке ресурсов работы многих узлов и агрегатов автомобиля. При этом в зависимости от параметра b оно может принимать самые разнообразные формы. При $b < 1$ – это убывающая функция; при $b \approx 1$ – совпадает с экспонентой; при $b \approx 3,3$ – совпадает с нормальным распределением.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение при этом законе распределения находятся по формулам:

$$t_{\text{ср}} = ak_{\text{в}}; \quad (4.33)$$

$$\sigma(t) = a q_b; \quad (4.34)$$

где k_b и q_b – коэффициенты, определяемые из выражений:

$$k_b = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad (4.35)$$

$$q_b = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - k_b^2}, \quad (4.36)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Коэффициент вариации случайной величины t определяется по формуле:

$$v = \frac{\sigma}{t_{cp}} = \frac{a q_b}{a k_b} = \frac{q_b}{k_b}. \quad (4.37)$$

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

$$b = f(v) = f(\sigma(t)/t_{cp}).$$

Для удобства вычислений при определении параметра формы b , а также коэффициентов k_b и q_b составлены специальные таблицы.

Если t предоставляет собой наработку до отказа, то вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность возникновения отказа $F(t)$ до этой наработки находятся по формулам:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}; \quad (4.38)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \quad (4.39)$$

Интенсивность отказов определяется выражением:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}. \quad (4.40)$$

Гамма-процентный ресурс (срок службы, сохраняемости) находится по формуле:

$$\frac{\gamma}{100} = e^{-\left(\frac{t_\gamma}{a}\right)^b}. \quad (4.41)$$

4.3. Статистическая обработка информации о надежности

4.3.1. Порядок обработки опытных данных

В первичной документации, где фиксируются результаты испытаний на надежность, содержатся данные, в которых трудно усмотреть какой-

либо порядок и закономерности. Обработка этих данных начинается с составления таблицы, в которой они располагаются в порядке увеличения полученных при испытаниях значений. Затем определяются границы их рассеивания, т.е. наибольшее t_{\max} и наименьшее t_{\min} значения. Разность между ними является размахом варьирования

$$R = t_{\max} - t_{\min} . \quad (4.42)$$

Далее устанавливается количество интервалов k , на которое необходимо разбить размах R . Число k должно быть не менее

$$k = 1 + 3,321qN, \quad (4.43)$$

где N – объем выборки испытаний.

Находится ширина интервала вариационного ряда h

$$h = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k} = \frac{R}{k}. \quad (4.44)$$

Определяются границы интервалов, для чего вначале устанавливается нулевое (крайнее) значение интервала t_0

$$t_0 = t_{\min} - h/2. \quad (4.45)$$

Следующие границы интервалов рассчитываются последовательным прибавлением ширины интервала h к предыдущему значению, т.е.

$$t_1 = t_0 + h; t_2 = t_1 + h; \dots; t_k = t_{\max} + h.$$

В каждом интервале определяется его середина

$$\bar{t}_i = \frac{t_i + t_{i+1}}{2}. \quad (4.46)$$

Устанавливается число попаданий наработок t в i -й интервал \bar{m}_i (опытная частота). 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 правило трех средних квадратических отклонений. В соответствии с ним результат испытаний относится к аномальному и должен быть исключен из дальнейшего анализа, если он выходит за границы допустимого разброса $\bar{t} \pm 3\sigma(t)$.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за долговечностью свечей зажигания у 80 двигателей установлены и сгруппированы по интервалам их наработки до отказа (табл. 4.1).

Значение наработки в первом интервале с частотой $\bar{m} = 1$ резко отличается от остальных экспериментальных данных. Проверим ее принадлежность к выборке.

Таблица 4.1

Параметр	Номера интервалов								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Границы интервалов, тыс. км	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	27-30	30-33	33-36	36-39
Средины интервалов \bar{t}_i , тыс. км	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5	31,5	34,5	37,5
Частота \bar{m}_i	1	-	4	16	21	17	12	7	2

Вычисляем среднее арифметическое наработки без подозреваемого результата

$$\bar{t}_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i \bar{m}_i = \frac{1}{79} (19,5 \cdot 4 + 22,5 \cdot 16 + 25,5 \cdot 21 + 28,5 \cdot 17 + 31,5 \cdot 12 + 34,5 \cdot 7 + 37,5 \cdot 2) = 27,25 \text{ тыс.км}$$

Вычисляем среднее квадратическое отклонение наработки

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \bar{t})^2 \bar{m}_i}{n-1}} = \sqrt{\frac{1484,06}{78}} = 4,37 \text{ тыс.км.}$$

Определяем границы допустимого разброса наработок до отказа относительно среднего значения \bar{t}_{cp}

$$27,25 \pm 3 \cdot 4,37 = [14,14; 40,36].$$

Следовательно, наработка, соответствующая первому интервалу, является аномальной, так как выходит за границы допустимого разброса и должна быть исключена из дальнейшего анализа.

Если имеется несколько подозреваемых данных, то \bar{t}_{cp} и σ определяются без них, а затем проводится проверка 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, по формулам 4.7, 4.8 и 4.9 определяем числовые характеристики: среднее арифметическое \bar{t}_{cp} , среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации v . В нашем примере значения среднего арифметического и среднего квадратического были определены при проверке аномальности подозреваемых результатов ($\bar{t}_{\text{cp}} = 27,25$; $\sigma = 4,37$). Они не изменились, так как рассчитывались без аномальных результатов. Значение коэффициента вариации составит:

$$v = \sigma / \bar{t}_{cp} = 4,37/27,25 = 0,16.$$

Затем определяются опытная частота \bar{m}_i , частость $w_i = \bar{m}_i/N$ и накопленная частость w_i^H . Накопленные частости w_i^H вычисляются путем последовательного прибавления частости w_i очередного интервала:

$$w_1^H = w_1; w_2^H = w_1^H + w_2; \dots; w_k^H = \sum_{i=1}^k w_i = 1.$$

Результаты расчета сводятся в таблицу. Для рассматриваемого примера найденные значения параметров сведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Номер интервала	Границы интервалов, тыс. км	Середина интервала, тыс. км	Частота \bar{m}_i	Частость w_i	Накопленная частость w_i^H
1	18 – 21	19,5	4	0,0506	0,0506
2	21 – 24	22,5	16	0,2025	0,2531
3	24 – 27	25,5	21	0,2658	0,5189
4	27 – 30	28,5	17	0,2152	0,7341
5	30 – 33	31,5	12	0,1519	0,8860
6	33 – 36	34,5	7	0,0887	0,9747
7	36 – 39	37,5	2	0,0253	1,0

Для установления закона распределения случайной величины t результаты обработки информации, представленные в табл. 4.2 оформляются графически в виде гистограммы, которая строится следующим образом. По оси абсцисс откладываются интервалы наработок и на их основании строятся прямоугольники, высота которых равна частостям этих интервалов w_i . Графическое изображение гистограммы по результатам наблюдений за свечами

зажигания представлено рис. 4.3.

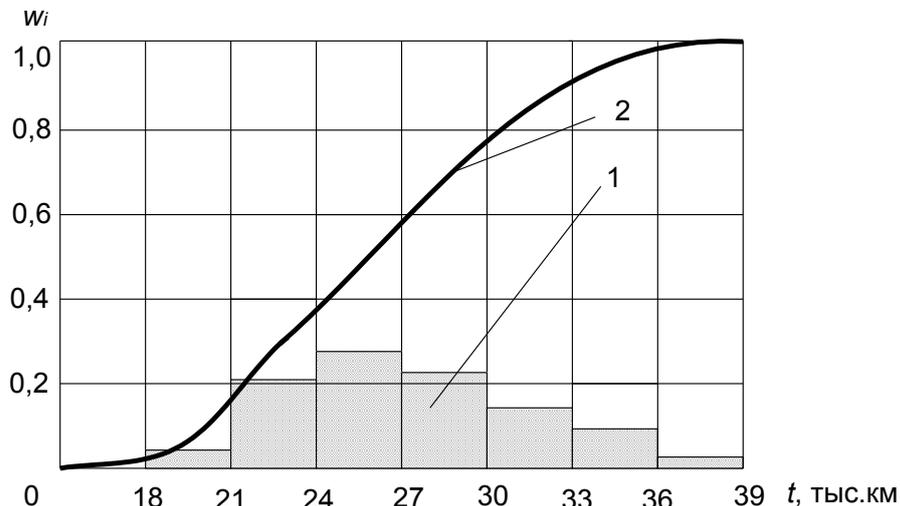


Рис. 4.3. Гистограмма распределения 1 и кумулятивная кривая 2 значений наработки свечей зажигания до отказа

Пользуясь данными табл. 4.2 по накопленным частотам w_i^H строится статистическая функция распределения наработки t (кумулятивная кривая) $\bar{F}(t)$.

По виду гистограммы и значению коэффициента вариации v подбирается теоретический закон распределения, который наилучшим образом описывает данное статистическое распределение. Известно, что нормальному закону распределения соответствует значение коэффициента вариации $v \leq 0,3$, Вейбулла – $v > 0,3$, экспоненциальному – $v = 1,0$.

4.3.2. Проверка гипотезы о принадлежности результатов исследований выбранному закону распределения

Для проверки гипотезы о принадлежности опытных данных выбранному закону распределения существуют соответствующие критерии согласия (χ^2 Пирсона, критерий Колмогорова и др.).

Критерий χ^2 Пирсона

Этот критерий нашел широкое применение из-за легкости его использования для проверки согласия любого распределения. Проверка правдоподобия гипотезы о принадлежности результатов испытаний к выбранному закону распределения записывается в виде альтернативного условия

$$\chi_{\text{опыт.}}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i} = \begin{cases} \leq \chi^2_{\text{табл.}} \left(\alpha \right) \\ & (S) \\ > \chi^2_{\text{табл.}} \left(\alpha \right) \\ & (S) \end{cases}, \quad (4.47)$$

где \bar{m}_i, m_i – опытное и теоретическое число попаданий отказов в i -й интервал; k – количество интервалов; α – уровень значимости; S – число степеней свободы ($S = k - r - 1$); r – число параметров теоретического закона распределения.

Если $\chi^2_{\text{опытн.}} \leq \chi^2_{\text{табл.}}$, гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому вероятностному закону не отвергается, в противном случае ее нельзя принять.

Уровень значимости α представляет собой вероятность того, что величина $\chi^2_{\text{опытн.}}$ в результате случайных отклонений частот опытного распределения от соответствующих частот теоретического распределения, будет меньше табличного значения $\chi^2_{\text{табл.}}$. Критические значения $\chi^2_{\text{табл.}}$ в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы S приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

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	6,3	3,8	2,7	1,6	11	24,7	19,6	17,2	14,6
2	9,2	5,9	4,0	3,2	12	26,2	21,0	18,5	15,8
3	11,3	7,8	6,2	4,6	13	27,6	22,3	19,8	16,9
4	13,2	9,5	7,7	5,9	14	29,1	23,6	21,0	18,1
5	15,0	11,0	9,2	7,2	15	30,5	24,9	22,3	19,3
6	16,8	12,5	10,6	8,5	16	32,0	26,2	23,5	20,4
7	18,4	14,0	12,0	9,8	17	33,4	27,5	24,7	21,6
8	20,0	15,5	13,3	11,0	18	34,8	28,8	25,9	22,7
9	21,6	16,9	14,6	12,2	19	36,1	30,1	27,2	23,9
10	23,2	18,3	15,9	13,4	20	37,5	31,4	28,4	25,0

Критерий Колмогорова

В соответствии с этим критерием определяется максимальное абсолютное отклонение D опытных значений функции распределения от теоретических (рис. 4.4).

$$D = \max |\bar{F}(t) - F(t)|. \quad (4.48)$$

Далее определяется величина $\lambda = D\sqrt{N}$ и по

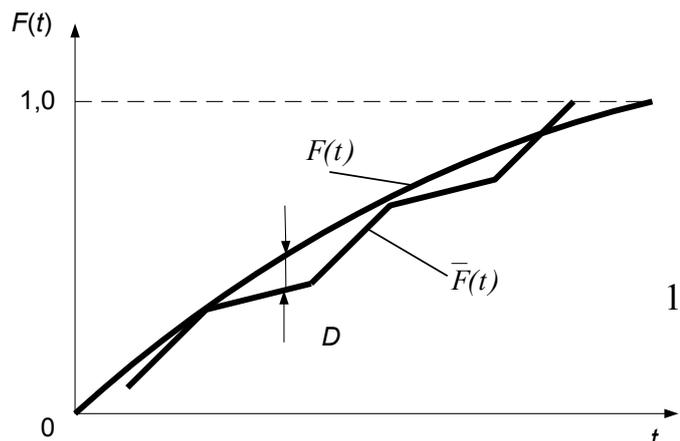


Рис. 4.4. Статистическая $\bar{F}(t)$ и теоретическая $F(t)$ функции распределения

табл. 4.4 находится вероятность $P(\lambda)$. Вероятность $P(\lambda)$ – это вероятность того, что за счет случайных причин максимальное расхождение между $\bar{F}(t)$ и $F(t)$ будет не меньше, чем фактически найденное при их сравнении. Если вероятность $P(\lambda)$ мала (меньше 0,05 – 0,1), то гипотезу о принадлежности опытных данных к выбранному закону следует отвергнуть как неправдоподобную; при $P(\lambda) \geq 0,6$ ее можно считать совместимой с опытными данными.

Обработка опытных данных, распределенных по экспоненциальному закону.

Последовательность обработки рассмотрим на примере.

Таблица 4.4

λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$
0,0	1,00	0,7	0,711	1,4	0,040
0,1	1,00	0,8	0,544	1,5	0,022
0,2	1,00	0,9	0,393	1,6	0,012
0,3	1,00	1,0	0,270	1,7	0,006
0,4	0,997	1,1	0,178	1,8	0,003
0,5	0,964	1,2	0,112	1,9	0,002
0,6	0,864	1,3	0,068	2,0	0,001

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за 35 автомобилями средний грузоподъемности были получены следующие наработки до отказа элементов системы освещения (тыс. км): 8,7; 14,0; 17,1; 72,7; 14,3; 9,9; 24,2; 26,6; 68,8; 40,1; 84,4; 17,7; 14,6; 7,1; 6,0; 22,6; 12,4; 11,6; 18,8; 27,3; 4,4; 9,2; 76,5; 13,4; 14,8; 13,8; 2,7; 46,6; 38,0; 11,0; 8,1; 42,9; 42,2; 59,4; 50,9. Требуется установить закон распределения наработок, проверить гипотезу о принадлежности опытных данных выбранному закону, построить график вероятностей безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$.

1. Определяем размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 84,4 - 2,7 = 81,7$ тыс. км; число интервалов $k = 1 + 3,32 \ln 35 = 6$; величину интервала $h = R/k = 81,7/6 = 15$ тыс. км; середины интервалов ($\bar{t}_1 = 7,5$; $\bar{t}_2 = 22,5$; $\bar{t}_3 = 37,5$; $\bar{t}_4 = 52,5$; $\bar{t}_5 = 67,5$; $\bar{t}_6 = 82,5$) тыс. км; частоты попаданий наработок в эти интервалы ($\bar{m}_1 = 16$; $\bar{m}_2 = 7$; $\bar{m}_3 = 4$; $\bar{m}_4 = 3$; $\bar{m}_5 = 3$; $\bar{m}_6 = 2$).

2. Строим гистограмму распределения частот \bar{m}_i (рис. 4.5). По виду гистограммы предполагаем, что распределение наработок до отказа подчиняется экспоненциальному распределению.

3. Определяем среднее значение наработки до отказа

$$\bar{t}_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k t_i \bar{m}_i = \frac{1}{35} (16 \cdot 7,5 + 7 \cdot 22,5 + \dots + 2 \cdot 82,5) = 27,2 \text{ тыс. км.}$$

4. Определяем интенсивность отказов λ

$$\lambda = 1/\bar{t}_{cp} = 1/27,2 = 0,0368 \text{ тыс. км}^{-1}.$$

5. Находим вероятности попаданий наработок t в каждый из интервалов (вероятность усеченного распределения)

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

Для первого интервала

$$p_{1y} = (0 < t_1 < 15) = e^{-0,0368 \cdot 0} - e^{-0,0368 \cdot 15} = 1 - 0,595 = 0,405.$$

Аналогично вычисляем вероятности попадания t в остальные интервалы:

$$p_{2y} = 0,262; p_{3y} = 0,143; p_{4y} = 0,079; p_{5y} = 0,048; p_{6y} = 0,025.$$

6. Определяем нормирующий множитель

$$C = 1 / \sum_{i=1}^6 p_i = 1 / 0,962 = 1,04.$$

7. Вычисляем исправленные вероятности

$$p_i = p_{iy} C$$

$$p_1 = p_{1y} \cdot 1,04 = 0,421;$$

$$p_2 = 0,279; p_3 = 0,149;$$

$$p_4 = 0,082; p_5 = 0,050;$$

$$p_6 = 0,026.$$

8. Определяем теоретические частоты $m_i = p_i N$.

Для первого интервала $m_1 = 0,421 \cdot 35 = 14,735$. Для последующих интервалов: $m_2 = 9,765$; $m_3 = 5,215$; $m_4 = 2,870$; $m_5 = 1,75$; $m_6 = 0,91$.

9. Находим значение критерия согласия χ^2 Пирсона по формуле 4.47. Для удобства все расчеты сводим в табл. 4.5.

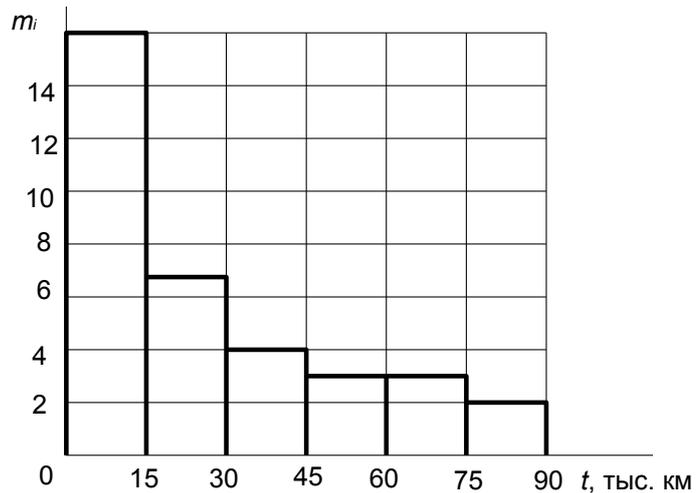


Рис. 4.5. Гистограмма распределения наработок элементов системы освещения до отказа

Таблица 4.5

i	\bar{m}_i	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1	16	14,735	1,265	1,600	0,111
2	7	9,77	-2,77	7,67	0,7850
3	4	5,21	-1,21	1,46	0,2802

4	3	2,87	0,13	0,02	0,0070
5	3	1,75	1,25	1,56	0,8914
6	2	0,91	1,09	1,19	1,3077
Σ	35				$\chi^2_{\text{опыт.}} = 3,38$

По таблице критических значений χ^2 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $S = k - r - 1 = 6 - 1 - 1 = 4$ находим $\chi^2_{\text{табл.}} = 9,5$. Так как $\chi^2_{\text{опыт.}} < \chi^2_{\text{табл.}}$ гипотеза о распределении наработок элементов системы освещения по экспоненциальному закону не отвергается.

10. По найденным значениям исправленной вероятности p_i определяем величины интегральных функций распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t) = 1 - F(t)$ по интервалам наработки:

$F(t_1) = p_1 = 0,421$; $F(t_2) = p_1 + p_2 = 0,421 + 0,279 = 0,700$ и т.д.

$P(t_1) = 1 - F(t_1) = 1 - 0,421 = 0,579$. Для остальных интервалов рассчитанные значения $F(t)$ и $P(t)$ представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Функции	Номера интервалов					
	1	2	3	4	5	6
$F(t_i)$	0,421	0,700	0,849	0,931	0,981	1,000
$P(t_i)$	0,579	0,300	0,151	0,069	0,019	0

Используя найденные значения $F(t)$ и $P(t)$, строим график (рис. 4.6).

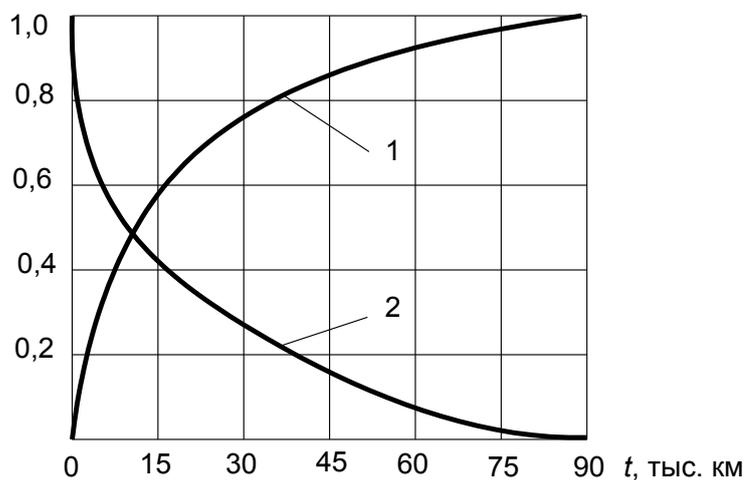


Рис. 4.6. График интегральной функции распределения отказов (1) и вероятности безотказной работы (2) по наработке t

Обработка опытных данных, распределенных по нормальному закону

Обработку и проверку гипотезы о принадлежности опытных данных нормальному распределению рассмотрим на примере.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за 47 двигателями ЗМЗ-4063.10 были установлены следующие наработки до отказа вкладышей коренных шеек коленчатого вала (тыс. км): 90, 95, 120, 115, 112, 122, 105, 116, 108, 129, 130, 145, 128, 142, 144, 148, 140, 139, 156, 170, 162, 174, 168, 171, 173, 168, 155, 169, 170, 191, 180, 186, 198, 190, 194, 179, 178, 204, 211, 203, 217, 221, 228, 231, 236, 250, 232.

Требуется установить закон распределения, проверить гипотезу о принадлежности статистических данных выбранному закону, определить основные параметры распределения отказов по наработке.

1. Последовательно определяем:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 250 - 90 = 160$ тыс. км;

- число интервалов $k = 1 + 3,32 \ln 47 = 7$;

- интервал $h = R/k = 160/7 = 22,9$ тыс. км. (принимаем $h = 25$ тыс. км);

- частоты попаданий наработок в эти интервалы ($\bar{m}_1 = 2$; $\bar{m}_2 = 7$; $\bar{m}_3 = 9$; $\bar{m}_4 = 11$; $\bar{m}_5 = 8$; $\bar{m}_6 = \bar{m}_7 = 5$);

- середины интервалов ($\bar{t}_1 = 87,5$; $\bar{t}_2 = 112,5$; $\bar{t}_3 = 137,5$; $\bar{t}_4 = 162,5$; $\bar{t}_5 = 187,5$; $\bar{t}_6 = 212,5$; $\bar{t}_7 = 237,5$).

2. Используя формулы (4.7; 4.8 и 4.9), вычисляем числовые характеристики выборки

$$\bar{t}_{\text{ср.}} = \frac{1}{47} (87,5 \cdot 2 + 112,5 \cdot 7 + \dots + 237,5 \cdot 5) = 166 \text{ тыс. км};$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{(87,5 - 166)^2 \cdot 2 + \dots + (237,5 - 166)^2 \cdot 5}{47 - 1}} = 40,6 \text{ тыс. км};$$

$$v = 40,6/166 = 0,24.$$

3. Строим гистограмму распределения частоты отказов вкладышей по наработке t (рис. 4.7).

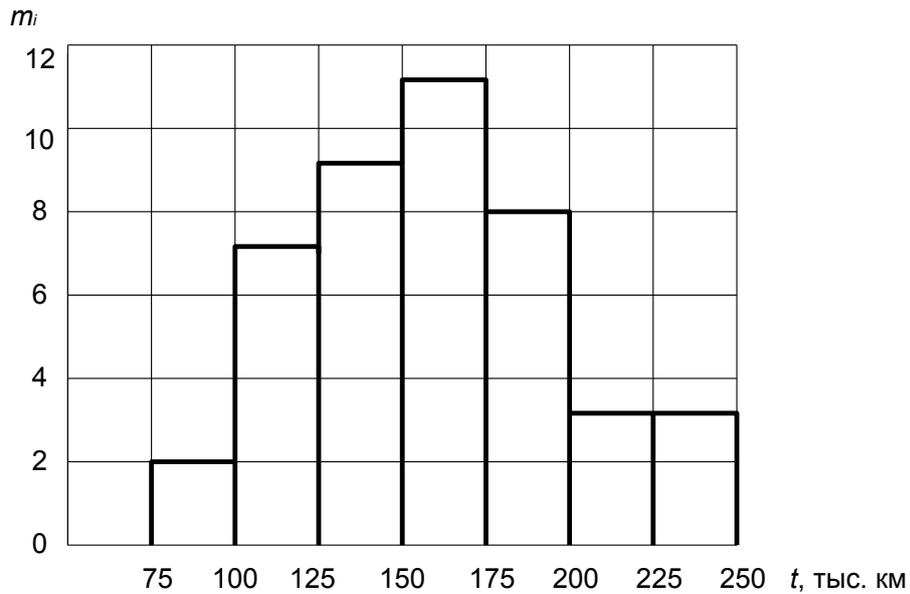


Рис. 4.7. Гистограмма распределения отказов вкладышей коренных шеек коленчатого вала по наработке t

По виду гистограммы и значению коэффициента вариации $v = 0,24$ предполагаем, что распределение отказов вкладышей подчиняется нормальному закону.

4. Для удобства вычислений пронормируем величину t , т.е. перейдем к новой случайной величине $z = \frac{t - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}$ и вычислим концы новых интервалов

$$z_i = \frac{t_i - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}; \quad z_{i+1} = \frac{t_{i+1} - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}.$$

Расчеты сводим с таблицу 4.7, полагая при этом, что левый конец первого интервала равен $-\infty$, а правый конец последнего интервала ∞ .

Таблица 4.7

i	Границы интервалов		$t_i - \bar{t}_{cp}$	$t_{i+1} - \bar{t}_{cp}$	Границы интервалов z_i	
	t_i	t_{i+1}			$z_i = \frac{t_i - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}$	$z_{i+1} = \frac{t_{i+1} - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}$
1	75	100	-	- 66	$-\infty$	-1,63
2	100	125	-66	-41	-1,63	-1,01
3	125	150	-41	-16	-1,01	-0,40
4	150	175	-16	9	-0,40	0,22
5	175	200	9	34	0,22	0,84
6	200	225	34	59	0,84	1,46

7	225	250	59	-	1,46	∞
---	-----	-----	----	---	------	----------

5. Вычисляем теоретические частоты $m_i = Np_i$, где $p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$ – вероятность попадания наработки t в интервалы (t_i, t_{i+1}) ; $\Phi(z)$ – функция Лапласа. С этой целью составим расчетную таблицу 4.8.

Таблица 4.8

i	Границы интервала		$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	Теоретические частоты $m_i = Np_i$
	z_i	z_{i+1}				
1	$-\infty$	-1,63	-0,5000	-0,4484	0,0516	2,43
2	-1,63	-1,01	-0,4484	-0,3438	0,1046	4,92
2	-1,01	-0,40	-0,3438	-0,1554	0,1884	8,85
4	-0,40	0,22	-0,1554	0,0871	0,2425	11,40
5	0,22	0,84	0,0871	0,2995	0,2124	9,98
6	0,84	1,46	0,2995	0,4279	0,1284	6,03
7	1,46	∞	0,4279	0,5000	0,0721	3,38

6. Рассчитываем значение критерия согласия χ^2 Пирсона (расчеты сводим в табл. 4.9).

Таблица 4.9

i	\bar{m}_i	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1	2	2,43	-0,43	0,1849	0,0761
2	7	4,92	2,08	4,3264	0,8793
3	9	8,85	0,15	0,0225	0,0025
4	11	11,40	-0,40	0,1600	0,0140
5	8	9,98	-1,98	3,9204	0,3928
6	5	6,03	-1,03	1,0609	0,1759
7	5	3,38	1,62	2,6244	0,7764
Σ	47				$\chi_{\text{опыт.}}^2 = 2,317$

По таблице критических значений χ^2 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $s = k - r - 1 = 7 - 2 - 1 = 4$ находим $\chi_{\text{табл.}}^2 = 9,5$. Так как $\chi_{\text{опыт.}}^2 < \chi_{\text{табл.}}^2$, гипотеза о принадлежности выборочных данных к нормальному закону распределения принимается.

7. Используя выражение (4.22), определяем вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ вкладышей на наработках, соответствующих серединам интервалов выборки \bar{t}_i . Для первого из них

$$P(t = 87,5) = 0,5 - \Phi\left(\frac{87,5 - 166}{40,6}\right) = 0,5 - \Phi(-1,933) = 0,9742.$$

$$F(t = 87,5) = 1 - P(t = 87,5) = 1 - 0,9742 = 0,0258.$$

Результаты расчета для остальных интервалов сводим в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Функции	Номера интервалов						
	1	2	3	4	5	6	7
$P(t_i)$	0,9742	0,9040	0,7580	0,5030	0,2980	0,1260	0,0392
$F(t_i)$	0,0258	0,0960	0,2420	0,4970	0,7020	0,8740	0,9608
$f(t_i), 10^{-3}$	0,0015	0,0041	0,0077	0,0098	0,0085	0,0051	0,0021
$\lambda(t_i), 10^{-3}$	0,0016	0,0045	0,010	0,0195	0,0285	0,0405	0,0531

По найденным значениям $P(t)$ и $F(t)$ строим график (рис. 4.8).

Плотность распределения $f(t)$ вычисляем по формуле (4.21) и табличным значениям для $f_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$. Для первого интервала выборки

$$f(t = 87,5) = \frac{1}{40,6} f_0\left(\frac{87,5 - 166}{40,6}\right) = 0,0246 \cdot 0,0620 = 0,001525 \cdot 10^{-3}.$$

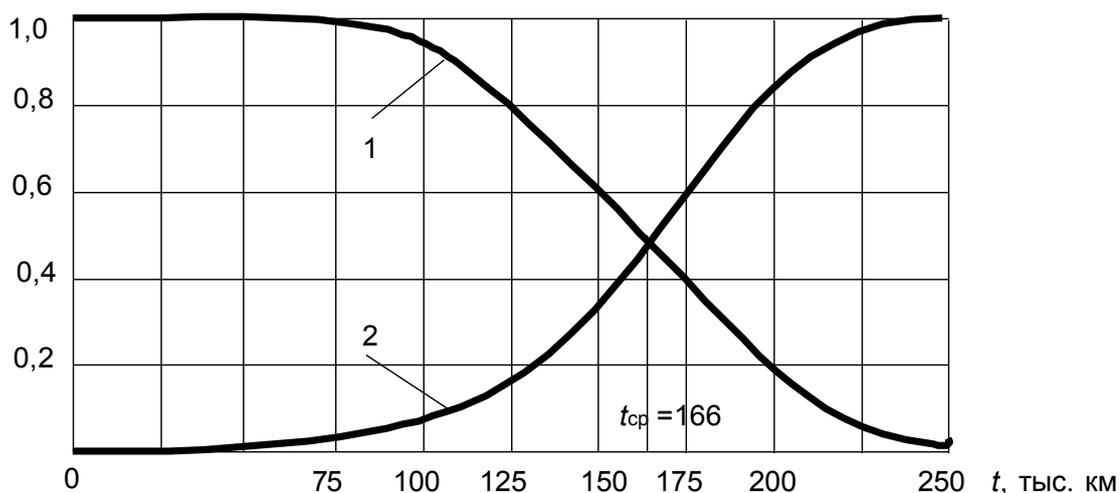


Рис. 4.8. График функций вероятности безотказной работы (1) и вероятности отказов (2)

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ на этой наработке

$$\lambda(t=87,5) = f(t=87,5)/P(t=87,5) = 0,001525 \cdot 10^{-3} / 0,9742 = 0,00156 \cdot 10^{-3}.$$

Для остальных интервалов наработки расчетные значения $f(t)$ и $\lambda(t)$ приведены в табл. 4.10. Графическое изображение характеристик $f(t)$ и $\lambda(t)$ представлено на рис. 4.9.

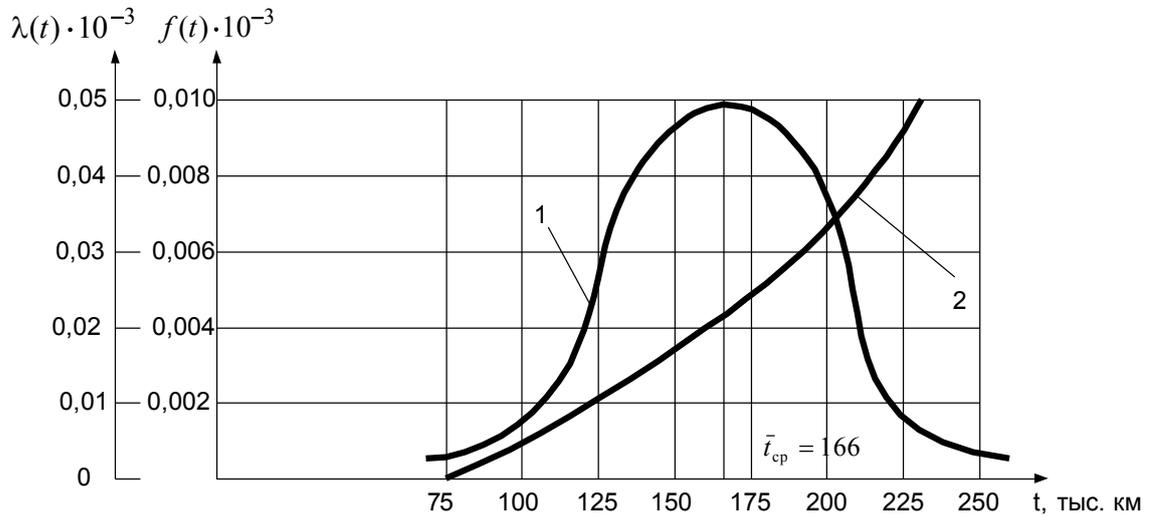


Рис. 4.9. График плотности распределения (1) и интенсивности отказов (2) вкладышей шеек коренных подшипников

Обработка опытных данных, распределенных по закону Вейбулла

Пример. По результатам эксплуатационных испытаний 50 автомобилей средней грузоподъемности установлены и сгруппированы по интервалам наработки до предельного состояния ведомых дисков сцепления (табл. 4.11). Определение значений R , k , h , \bar{t}_i , \bar{m}_i осуществлялась по той же методике, что и для других законов распределения.

Таблица 4.11

Номера интервалов	1	2	3	4	5	6	7
Границы интервалов, тыс. км	15-30	30-45	45-60	60-75	75-90	90-105	105-120
Средины интервалов, тыс. км	22,5	37,5	52,5	67,5	82,5	97,5	112,5
Частота попаданий \bar{m}_i	6	14	12	9	6	2	1

1. Определяем числовые характеристики выборки:

$$\bar{t}_{\text{сп}} = \frac{1}{50} (22,5 \cdot 6 + 37,5 \cdot 14 + \dots + 112,5 \cdot 1) = 54 \text{ тыс. км};$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{(22,5 - 54)^2 \cdot 6 + (37,5 - 54)^2 \cdot 14 + \dots + (112,5 - 54)^2}{49}} = 22,4 \text{ тыс. км};$$

$$\nu = 22,4/54 = 0,41.$$

2. Строим гистограмму распределения частоты отказов (рис. 4.10).

По виду гистограммы и коэффициенту корреляции $\nu = 0,41$ предполагаем, что отказы ведомых дисков согласуются с законом Вейбулла.

3. По табл. значений параметров распределения Вейбулла для коэффициента вариации $\nu = 0,41$ находим

$$b = 2,7; k_b = 0,890; q_b = 0,350.$$

4. Из выражения (4.33) определяем второй параметр распределения (параметр масштаба a)

$$a = \bar{t}_{cp} / k_b = 54/0,890 = 60,7 \text{ тыс. км.}$$

5. Вычисляем теоретические вероятности попадания случайной величины t_i в интервалы наработки

$$p_i(t_i < t < t_{i+1}) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} - e^{-\left(\frac{t_{i+1}}{a}\right)^b}.$$

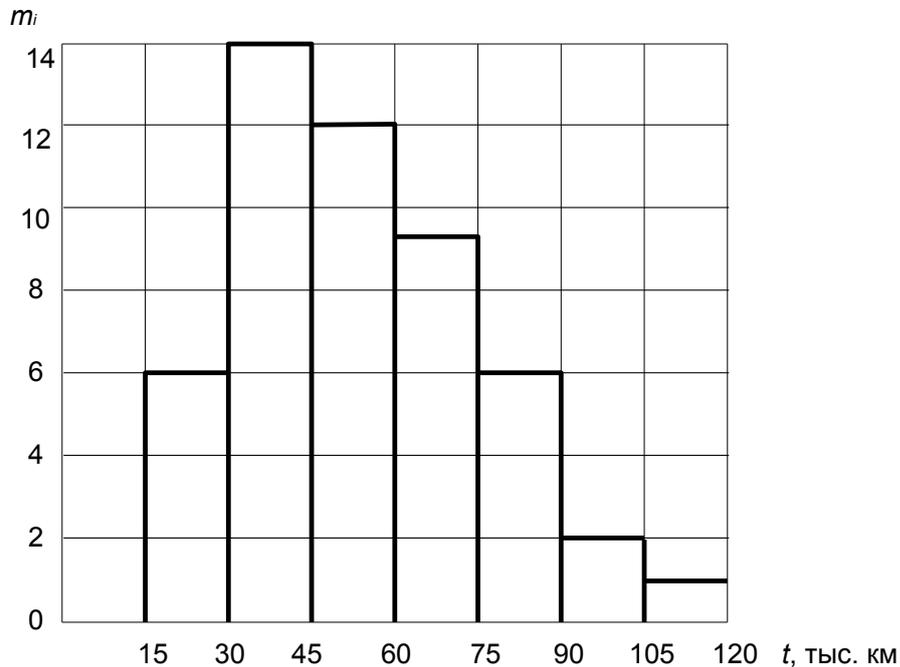


Рис. 4.10. Гистограмма распределения частоты отказов ведомых дисков сцепления автомобилей средней грузоподъемности

Для первого интервала

$$p(t_1) = e^{-\left(\frac{15}{60,7}\right)^{2,7}} - e^{-\left(\frac{30}{60,7}\right)^{2,7}} = e^{-0,0237} - e^{-0,1539} = 0,12.$$

Для остальных интервалов найденные значения $p(t_i)$ сводим в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Номер интервала \ Характеристики	1	2	3	4	5	6	7
1. Теоретические вероятности $p(t_i)$	0,12	0,224	0,263	0,210	0,110	0,038	0,035
2. Теоретические частоты m_i	6	11,2	13,15	10,5	5,5	1,9	1,82
3. Интегральная функция $F(t_i)$	0,12	0,344	0,607	0,817	0,927	0,965	1,00
4. Вероятность безотказной работы $P(t_i)$	0,88	0,656	0,393	0,183	0,073	0,035	0
5. Интенсивность отказов $\lambda(t_i)$	0,0083	0,0200	0,0348	0,0537	0,0759	0,1011	0,1281
6. Плотность распределения $f(t_i)$	0,0073	0,0131	0,01367	0,0098	0,0055	0,0035	0

6. Вычисляем теоретические частоты попадания отказов в интервалы наработки:

$$m_1 = p(t_1) \cdot N = 0,12 \cdot 50 = 6;$$

$$m_2 = p(t_2) \cdot N = 0,224 \cdot 50 = 11,2 \text{ и т.д.}$$

Для остальных интервалов расчетные значения m_i приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

i	\bar{m}_i	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1	6	6	0	0	0
2	14	11,2	2,8	7,84	0,7
3	12	13,15	1,15	1,3225	0,1
4	9	10,5	1,5	2,25	0,214
5	6	5,5	0,5	0,25	0,045
6	2	1,9	0,1	0,01	0,005
7	1	1,825	0,825	0,681	0,373
Σ	50				$\chi_{\text{опыт.}}^2 = 1,44$

8. По таблице значений критерия Пирсона при уровне значимости

$\alpha = 0,05$ и $S = 4$ находим $\chi_{\text{табл.}}^2 = 9,5$. Гипотеза о принадлежности опытных данных закону Вейбулла не отвергается, так как $\chi_{\text{опыт.}}^2 < \chi_{\text{табл.}}^2$.

9. Для построения кривых вероятностей отказа $F(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t)$ воспользуемся формулами

$$F(t_i) = \sum_1^i p(t_i); \quad P(t_i) = 1 - F(t_i).$$

Результаты расчета сведены в табл. 4.12 и изображены графически на рис. 4.11.

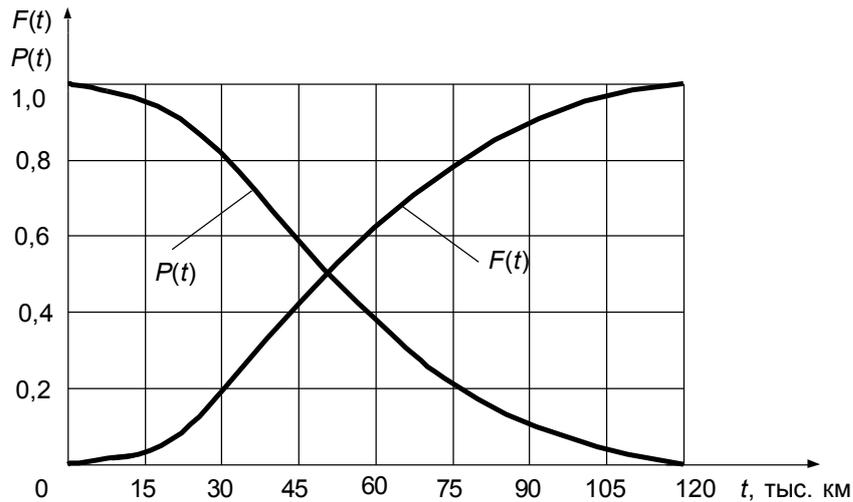


Рис. 4.11. График вероятностей отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$ ведомых дисков сцепления

10. Используя формулу (4.40) рассчитываем интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность вероятностей распределения $f(t)$ по интервалам наработки t_i . Для первого интервала

$$\lambda(t_1 = 22,5) = \frac{2,7}{60,7} \left(\frac{22,5}{60,7} \right)^{2,7-1} = 0,045 \cdot 0,37^{1,7} = 0,0083;$$

$$f(t_1) = P(t_1) \lambda(t_1) = 0,88 \cdot 0,0083 = 0,0073.$$

Аналогично рассчитываем $\lambda(t)$ и $f(t)$ для остальных интервалов и результаты сводим в табл. 4.12. Графическое изображение кривых $\lambda(t)$ и $f(t)$ представлено на рис. 4.12.

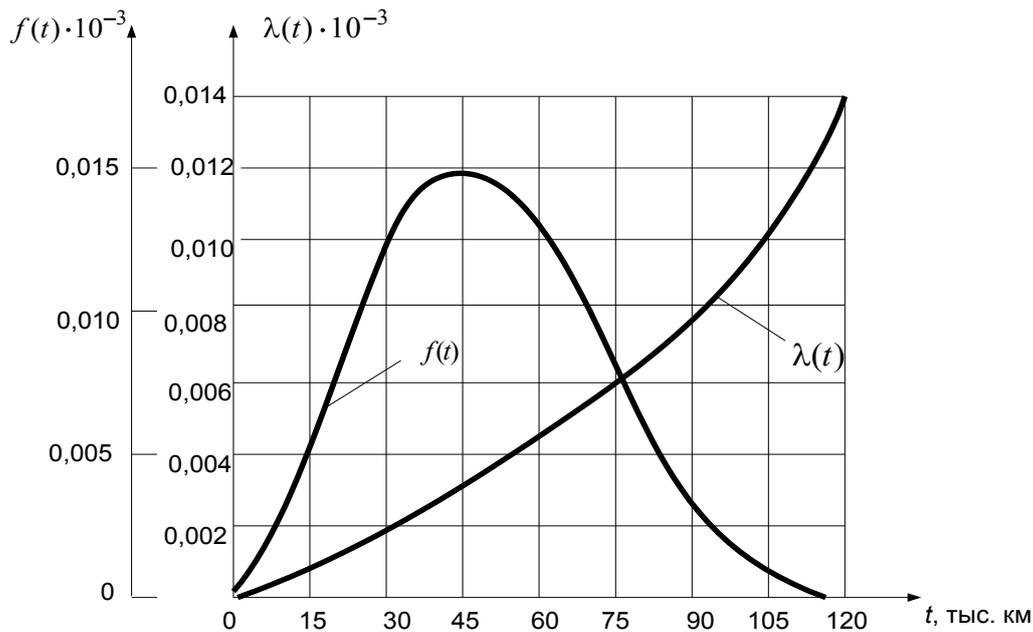


Рис. 4.12. График плотности распределения $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ ведомых дисков сцепления

4.4. Обработка информации по надежности при незавершенных испытаниях

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 незавершенными испытаниями, причинами которых могут быть: неодновременность начала испытаний, большая длительность их проведения, снятие части изделий с испытаний из-за возникновения отказов иного характера, чем изучаемый, аварии и другие причины.

При эксплуатационных испытаниях автомобилей наиболее типичными являются случаи, когда к моменту прекращения испытаний в выборке имеются работоспособные изделия, наработка которых до предельного состояния не установлена из-за прекращения испытаний. Например, при испытании 30 автомобилей на наработке 150 тыс. км отказало 25 исследуемых элементов. Нарботки остальных пяти неизвестны, так как испытания этих автомобилей были приостановлены по различным причинам, а исследуемые элементы не достигли своего предельного состояния. В этом случае оценка показателей надёжности только по 25 отказавшим элемен-

там была бы необъективной, так как не учтены потенциальные ресурсы пяти оставшихся элементов, испытания по которым были приостановлены.

При незавершенных испытаниях обработка информации осуществляется 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.

Наработка изделий за время испытаний разбивается на интервалы. Составляется таблица распределения наработок отказавших и не отказавших из-за приостановки испытаний изделий по интервалам группировки. Вероятность отказа к концу интервала с учётом не отказавших изделий определяется по формуле

$$F(t) = \frac{m_i}{N+1}, \quad (4.49)$$

где N – общее количество изделий в выборке; m_i – прогнозируемое количество отказов к концу i -го интервала с учётом не отказавших из-за приостановки испытаний изделий.

Прогнозируемое количество отказов m_i определяется из выражения

$$m_i = m_{(i-1)} + k_i n_i, \quad (4.50)$$

где $m_{(i-1)}$ – прогнозируемое число отказов в интервале $(i - 1)$; n_i – количество отказавших изделий в i -ом интервале; k_i – коэффициент приращения отказов в i -ом интервале

$$k_i = \frac{N+1 - m_{(i-1)}}{N+1 - \sum g_i - \sum n_{(i-1)}}, \quad (4.51)$$

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 расчёта на конкретном примере.

Пример. При проведении эксплуатационных испытаний на долговечность тормозных накладок передних колёс 40 автомобилей средней грузоподъёмности были получены и сгруппированы по интервалам наработки до предельного состояния (табл. 4.14). Из выборки 10 автомобилей были сняты с испытаний по разным, не относящимся к испытываемым деталям, причинам. Требуется определить показатели надёжности тормозных накладок, с учётом снятых с испытания автомобилей.

По формулам (4.49), (4.50), (4.51) рассчитываем величины k_i , m_i , $F(t_i)$.

Таблица 4.14

Интервалы наработки, тыс. км	n_i	Σn_i	g_i	Σg_i	k_i	m_i	$F(t_i)$
20 – 30	1	1	-	-	1	1	0,024
30 – 40	4	5	1	1	1,026	5,104	0,124
40 – 50	11	16	2	3	1,088	17,072	0,416
50 – 60	9	25	3	6	1,259	28,403	0,693
60 – 70	3	28	3	9	1,799	33,800	0,824
70 – 80	2	30	1	10	2,400	38,600	0,941

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

$$k_3 = \frac{40+1-5,104}{40+1-3-5} = 1,088; \quad m_3 = 5,104 + 1,088 \cdot 11 = 17,072;$$

$$F(t_3) = \frac{17,072}{41} = 0,416.$$

Таким же образом рассчитываем k_i , m_i , $F(t_i)$ для остальных интервалов наработки и результаты сведём в таблицу 4.14. После того как определено прогнозируемое количество отказов m_i по интервалам наработки, дальнейшая обработка информации проводится так же, как и при завершённых испытаниях.

Контрольные вопросы

1. Как определяется объём представительной выборки обследования?
2. Назовите основные числовые характеристики распределения случайной величины наработки.
3. Объясните физический смысл обобщённых зависимостей $P(t)$, $F(t)$ и $f(t)$.
4. Как осуществляется сбор и обработка информации о надёжности автомобилей в условиях эксплуатации?
5. С помощью каких критериев согласия проверяются гипотезы о принадлежности опытных данных выбранному закону распределения?
6. Какие основные законы распределения используются для обработки информации о надёжности автотранспортных средств?
7. Приведите порядок обработки информации об отказах, описываемых экспоненциальным, нормальным, логарифмически-нормальным законами и распределением Вейбулла.
8. Постройте графики интегральной функции распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работ $P(t)$ для вышеназванных законов.
9. Как изменяются по наработке плотность распределения $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ для экспоненциального и нормального распределений?
10. Как определяются показатели надёжности при незавершённых испытаниях?
11. Приведите примеры отказов, описываемых вышеперечисленными законами.
- 12.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Одной из главных задач инженерно-технической деятельности при разработке и проектировании продукции машиностроения является созда-

188

ние конкурентоспособных машин. При этом среди многих факторов, определяющих качество и, соответственно, конкурентоспособность машин, особое место следует отнести их надежности.

Приоритетное место надежности машин при их проектировании и изготовлении подтверждается статистическими данными, свидетельствующими о том, что расходы на поддержание их в работоспособном состоянии непрерывно растут. Суммарные ежегодные затраты только на капитальные ремонты технических средств составляют 25 - 30 млрд. руб. Около 30 – 35 % металлорежущих станков занято изготовлением запасных частей, 20 – 25 % выплавляемого металла расходуется на эти же цели. Численность рабочих, ремонтирующих и обслуживающих автомобили, в 4 - 5 раз превышает число рабочих, занятых на производстве новых автомобилей. Трудозатраты на ремонт двигателя внутреннего сгорания за срок его службы в 8 - 12 раз больше, чем на изготовление нового.

Надежность на этапах разработки и производства машин должна рассматриваться как один из важнейших факторов, определяющих их качество и конкурентоспособность. Разработка машин включает в себя несколько этапов: проектирование; конструирование; изготовление опытного образца, его испытание и доводку; постановку на серийное производство; серийное производство.

Проектирование – это процесс разработки машин на уровне чертежей, который включает в себя несколько стадий (рис. 5.1).

Процесс проектирования на всех стадиях сводится к графическому (чертежному), текстовому и математическому описанию еще не существующей машины на основе первичного представления о её функционировании. Итоговым результатом процесса проектирования является технический проект, содержащий чертежную и текстовую информацию, необходимую для выпуска конструкторской документации.

Конструирование машин включает разработку вариантов конструкции деталей и узлов (сборочных единиц), расчеты их кинематики и динамики, тепловые и прочностные расчеты, расчеты надежности и экономических показателей.

В связи со значительной сложностью современных машин перед постановкой их на производство изготавливают и подвергают всевозможным испытаниям опытный образец. По результатам испытаний и доводки опытного образца устанавливают технические и эксплуатационные характеристики машины.

Постановка машин на производство предусматривает технологическую, материально-техническую и организационную подготовку производства для их серийного выпуска. Вначале изготавливают и испытывают установочную партию машин, по результатам которых конструкторскую документацию корректируют.



Рис. 5.1. Структура процесса проектирования машины

Усилия всех участников сложного процесса разработки, освоения и производства машин должны быть направлены на обеспечение их высокого качества за счет, главным образом, достижения наивысшего уровня надежности.

5.1. Конструктивные методы обеспечения надежности машин

Повышение надежности машин при конструировании направлено, главным образом, на увеличение их сопротивляемости внешним воздействиям и включает ряд мероприятий, выполнение которых способствует решению поставленной задачи.

Оптимизация компоновочного решения машины

Одним из важнейших условий обеспечения высокой надежности машин при их разработке является обоснованный выбор структуры машины и состава её основных частей. Этот этап проектно-конструкторских работ называется компоновкой машины, принципы которой показаны на рис. 5.2.

Принцип минимизации структурных единиц и элементов конструкции предусматривает сокращение до оптимального уровня числа структурных единиц и элементов конструкции машины при её компоновке без ущерба выполнения ею заданных функций. С увеличением количества элементов в машине существенно снижаются её показатели безотказности.

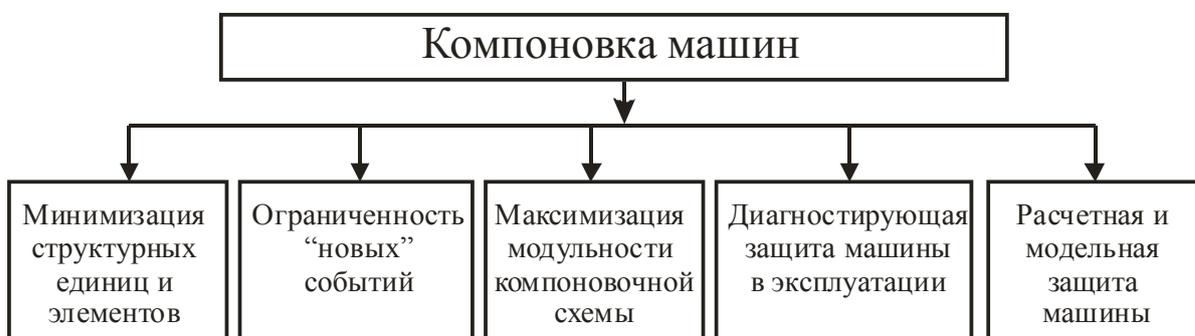


Рис. 5.2. Принципы компоновки машины для обеспечения её высокой надежности

Принцип ограниченности «новых» событий предусматривает ограничение принципиально новых, не проверенных практикой элементов конструкций и структурных единиц. Применение нового элемента в составе машины может быть оправдано лишь тогда, когда без этого элемента не могут быть обеспечены заданные функциональные параметры, и при условии проведения всестороннего расчетно-экспериментального анализа надежности этого элемента.

Принцип модульности означает, что техническое устройство должно быть составлено из экономически обоснованного минимального числа однотипных элементов, получивших название модулей. Модуль – конструктивно и технологически завершённая структурная единица машины, обоснованно выбранная из множества возможных вариантов структурных единиц одинакового функционального назначения. Модуль машины может иметь различную структурную сложность: от сборочной единицы до механизма, сопряжения и отдельной детали.

Модульная компоновка нашла широкое распространение в автомобилестроении. При разработке, например, легкового автомобиля маркетологи фирмы формируют образ машины, которая будет востребована через несколько лет. Затем конструкторы создают контуры будущего автомобиля и начинают его компоновку. Прорабатывается чертеж с основными размерами автомобиля и расположением пассажиров в салоне, подбирается платформа и основные модули агрегатов, узлов, систем. Основная задача компоновки – оптимальным образом разместить все агрегаты и системы внутри кузова.

Современные компьютерные программы с обширными базами данных позволяют не только выполнить различные варианты компоновок и представить на экране их трехмерное изображение, но и произвести в кратчайшие сроки все необходимые конструкторские расчеты, в т. ч. на долговечность и безотказность.

Принцип диагностирующей защиты означает возможность постоянного или регламентного определения технического состояния машины в процессе эксплуатации. Соблюдение этого принципа при компоновке машины является необходимым условием обеспечения высокого уровня их эксплуатационной надежности.

Принцип расчетной и модульной защиты предусматривает обязательную графическую и расчетную проверку машины при её проектировании. По чертежам отдельных деталей в масштабе 1:1 вычерчивают сборочные чертежи узлов и машины в целом и затем из различных материалов изготавливают модель машины. Это исключает возможность масштабных, габаритных и эстетических ошибок при производстве машины.

Расчетная защита на этапе проектирования заключается в необходимости выполнения проектных расчетов всех элементов конструкции на прочность до передачи машины в производство.

Выполнение перечисленных принципов компоновки автомобилей обеспечивает высокий уровень её эксплуатационной надежности. Однако современные требования к активной, пассивной и экологической безопасности, снижению удельного расхода топлива, удобству управления и комфорту, а также все большее насыщение автомобилей электроникой вступают, как правило, в противоречие с принципами их компоновки, поэтому конструкторы вынуждены постоянно искать компромиссные решения.

Рациональный выбор материалов для узлов трения

При выборе материалов для пар трения к ним предъявляется ряд требований, к которым, прежде всего относятся:

- легкая прирабатываемость;
- высокая износостойкость при нормальных условиях работы;
- низкий коэффициент трения;
- отсутствие молекулярного схватывания в условиях несовершенной смазки.

К материалам деталей, подвергающихся при эксплуатации воздействию циклических и динамических нагрузок, наряду с перечисленными дополнительно предъявляются требования высокой *усталостной прочности и ударной вязкости*. Материалы таких деталей, как шестерни, подшипники, кулачковые валы, крестовины карданных валов и дифференциалов должны отвечать дополнительно требованию высокой контактной усталостной прочности.

Стремление максимально повысить износостойкость материалов деталей в узлах трения привело к появлению разнообразных антифрикционных материалов (рис. 5.3). При разработке конструкции узла трения должен быть обеспечен их рациональный выбор.

Стали являются наиболее распространенным материалом в узлах трения, так как большинство деталей машин до настоящего времени изготавливается из стали.

Для повышения износостойкости поверхности деталей из углеродистых сталей упрочняют (цементирование, азотирование, закалка, лазерная обработка).

Аустенитно-ферритные стали обладают более высокой твердостью, а следовательно, и износостойкостью по сравнению с аустенитами.

Высоколегированные стали предназначены для узлов трения, работающих в средах с высокой агрессивностью. Наибольшее распространение получили сплавы на основе: никель-молибден, никель-хром, никель-хром-молибден.

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 чугуна, цветных металлов, пластмасс, керамических и других композитных материалов.



Рис. 5.3. Антифрикционные материалы, используемые в узлах трения

Антифрикционные свойства *чугунов* обусловлены наличием в их структуре свободного графита, который за счет пористости способствует проникновению смазки в поверхностные слои материала и её удержанию.

Цветные металлы являются наиболее распространенными материалами для изготовления подшипников скольжения. Высокие антифрикционные свойства цветных металлов на основе меди (латуни и бронзы) обуславливаются избирательным переносом меди из твердого расплава в сталь и обратно, что обеспечивает снижение коэффициента трения.

Из цветных сплавов наибольшее применение получили баббиты (оловянные и свинцовые).

Полимерные материалы прочно прописались в современных автомобилях, вытесняя сталь, чугун и цветные металлы из двигателя, шасси и кузова. Механические свойства полимерных материалов обеспечиваются за счет использования в качестве наполнителя тканей, стекло- и углеволокна, специальных порошков и т.д.

Изготовленные американской фирмой «*Polimotor Research*» опытные двигатели из композитных полимеров на основе стекло- углеволокна фе-

нольной смолы существенно легче (табл. 5.1) и технологичнее при производстве.

Фенольная смола, усиленная стекловолокном, обладают высокой прочностью и жесткостью. При уменьшении веса двигателя на 50% существенно снижаются вибрации, что позволяет увеличить его срок службы примерно вдвое.

Таблица 5.1

Наименование детали	Композитный материал, г	Сталь, г	Алюминиевый сплав, г
Блок цилиндров	14000	41000	23000
Головка блока	10000	25000	17000
Поршень	250	-	500
Поршневой палец	50	140	-
Шатун	400	800	550
Толкатель	25	75	-
Клапанное коромысло	150	400	300
Впускной клапан	20	100	-
Колпак клапанного механизма	230	1800	900
Распределительная шестерня	340	900	450
Маховое колесо	900	3600	1800
Корпус водяного насоса	300	1400	450
Поддон картера	400	2700	1400

Керамические материалы применяют в узлах трения без смазки при высоких температурах и агрессивных средах.

В автомобилестроении все большее распространение получают металлокерамические материалы, представляющие собой композиты на основе окислов алюминия, кремния и магния (поршни, клапаны, накладки дисков сцепления, тормозные диски и др.). Изготовленные, например, из керамических волокон с наполнителем из алюминиевого сплава поршни отличаются высокой износостойкостью.

Оптимизация геометрической формы деталей узлов трения

Реальный процесс изнашивания, подчиняясь определенным закономерностям, приводит к минимизации его интенсивности за счет образования оптимальной шероховатости, структуры поверхности и её геометрической формы в переходный период. В связи с этим наряду с факторами, учитывающими износостойкость материалов элементов узла трения, для повышения его надежности необходима оптимизация геометрии сопряженных элементов конструкции.

Продолжительность переходного периода (рис. 5.4) оказывает существенное влияние на ресурс узла трения. В связи с этим оптимизация геометрической формы элементов конструкции узла трения физически связана с минимизацией продолжительности переходного периода $t_{\text{пр}}$. Это положение обусловлено тем, что геометрические формы элементов конструкции, как правило, не совпадают с оптимальными, присущими процессу нормального изнашивания, когда его интенсивность минимальна.

Таким образом, наряду с оптимизацией шероховатости и повышением точности обработки сопряженных поверхностей, необходимо придание поверхностям кинематической пары формы, соответствующей нормальному изнашиванию уже в процессе изготовления элементов конструкции. Из рис. 5.4 видно, что после модернизации геометрической формы элементов в узле трения продолжительность переходного периода $t_{\text{пр}}$ снизилась, а ресурс T_p существенно увеличился.

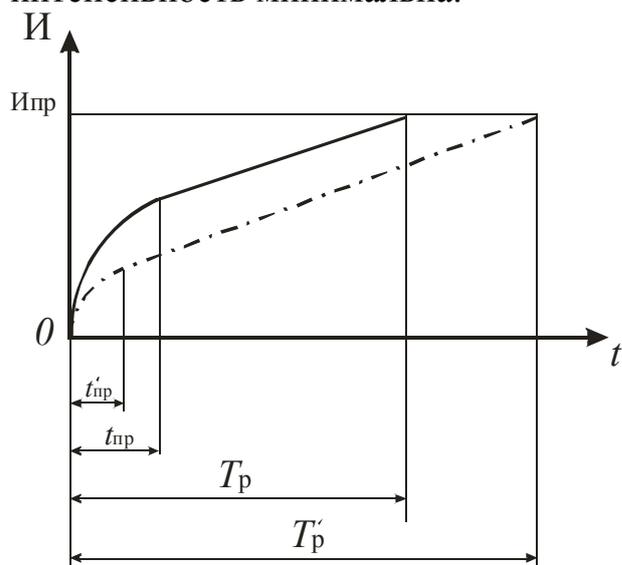


Рис. 5.4. Схема процесса изнашивания: $t_{\text{пр}}, t'_{\text{пр}}$ – продолжительность переходного периода до и после модернизации геометрической формы; T_p, T'_p – ресурсы до и после модернизации геометрической формы

Изменением формы коленчатых валов, клапанов, поршней, блока цилиндров и других деталей существенно повышается ресурс двигателей. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) с их широкими функциональными возможностями позволяют существенно ускорить процесс оптимизации геометрических форм элементов самых различных агрегатов и узлов автомобиля.

Обеспечение нормальных условий работы

Для обеспечения нормальной работы деталей необходимо, прежде всего, определить рациональные размеры контактирующих поверхностей, их геометрическую форму, рассчитать действующие нагрузки и другие параметры сопряжений, обеспечивающие *наименьшие потери на трение*.

Поверхности подшипников скольжения рассчитывают, например, 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, применять подшипники качения. Это значительно 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 соприкосновения с кольцом и возникающие при эксплуатации нагрузки распределяются значительно равномернее. Как показали стендовые испытания в режиме форсированных нагрузок, долговечность роликов в 5-9 раз превышает долговечность шариков.

Существенное влияние на интенсивность и характер изнашивания оказывает температурные условия рабочих процессов. В связи с этим обеспечение *оптимальных тепловых режимов* работы различных сопряжений, узлов и агрегатов автомобилей играет существенную роль в повышении их долговечности. Оптимизация теплового режима работы с целью минимизации интенсивности изнашивания особенно важна для такого нагруженного агрегата как двигатель.

Регулирование температуры нагрева деталей двигателя осуществляется за счет охлаждения жидкостей (или воздуха) и картерного масла, а также за счет различных конструктивных решений. К ним, прежде всего, следует отнести: создание теплоизолирующих прорезей (в головках блока и поршнях), заполнение пустотелых впускных клапанов металлическим натрием, использование управляемых электроникой термостатов, охлаждение днищ поршней струей масла из специальных форсунок в блоке цилиндров.

На современных тяжелых грузовиках внедряются такие конструктивные решения, как отключение вентилятора зимой или при прогреве с помощью фрикционной пневмоуправляемой муфты, электроподогрев дви-

гателя и следящий за температурой масла водомасляный теплообменник, специальный радиатор для охлаждения редуктора главной передачи и т.д.

К мероприятиям по обеспечению нормальных условий работы относятся конструкторские разработки по *оптимизации смазки трущихся поверхностей*. В конструкциях современных машин стремятся обеспечить жидкостное или, по крайней мере, граничное трение сопряженных деталей, снижающих интенсивность их изнашивания. У современных двигателей все основные сопряжения смазываются под давлением. Этот прогрессивный вид смазки все шире используется и в других механизмах автомобиля, например, в трансмиссии.

Обеспечение оптимальных условий изнашивания в зоне трения предусматривает *создание высококачественных устройств для очистки масел, топлива и воздуха*. Эффективность фильтров очистки зависит, в основном, от качества и количества используемой в них специальной (пропитанной и термически обработанной) фильтрующей бумаги и оценивается тонкостью очистки, т.е. размером задерживаемых микрочастиц загрязнения.

Особо высокие требования предъявляются в настоящее время к масляным фильтрам, которые наряду с высокой степенью очистки (до 10 - 20 мкм) должны обеспечивать гарантированное прохождение масла через фильтрующий элемент, устойчивость против давления, надежную работу обратного и перепускного клапанов. Применение таких фильтров позволяет повысить ресурс двигателя на 20 – 25 %.

Повышение уровня ремонтпригодности

Весьма перспективным направлением повышения надежности машин является совершенствование их конструкций с позиций требований *ремонтпригодности*.

В области автомобилестроения в последние годы осуществлен целый комплекс конструкторско-технологических мероприятий по повышению надежности автомобилей, однако они далеко не в полной мере отвечают требованиям ремонтпригодности. Это приводит к большим материальным затратам на ремонтные и профилактические работы.

В связи с тем, что объемы, характер и содержание работ, осуществляемых при ТО и ремонте, различны, следует разделять такие понятия ремонтпригодности, как:

- эксплуатационная технологичность;
- ремонтная технологичность.

Эксплуатационная технологичность представляет собой свойство конструкции автомобиля, которое характеризует его приспособленность к поддержанию работоспособности, т.е. проведению всех видов ТО и эксплуатационных ремонтов в условиях АТП.

Ремонтная технологичность представляет собой свойство конструкции автомобиля, которое характеризует его приспособленность к ремонтным работам, осуществляемым для восстановления утраченной работоспособности с целью обеспечения заданного ресурса.

Ремонтопригодность автомобиля определяется его контролепригодностью, доступностью, легкоъемностью, взаимозаменяемостью, преемственностью оборудования.

Контролепригодность – это свойство автомобиля, заключающееся в его приспособленности к контролю технического состояния методами технической диагностики.

Доступность конструкции узлов автомобиля – это свойство, характеризующее их приспособленность к быстрому и удобному осуществлению технологических операций при устранении отказов, проведении ТО и ремонтов.

Легкоъемность – это свойство конструкции автомобиля, характеризующее приспособленность к выполнению операций разборки и сборки, необходимых для замены отказавших деталей.

Преемственность оборудования означает возможность использования уже имеющегося на АТП, СТОА, АРЗ оборудования для осуществления ТО и ремонта автомобилей новых моделей.

Для обеспечения высокого уровня ремонтнопригодности современные автомобили должны отвечать ряду требований к эксплуатационной и ремонтной технологичности.

1. При разработке новых автомобилей необходимо максимально применять нормализованные и стандартизованные детали и узлы, хорошо себя зарекомендовавшие в существующих моделях. При этом с целью сокращения номенклатуры инструмента и приспособлений для нужд эксплуатации и ремонта необходимо минимизировать количество типоразмеров стандартных элементов.

2. В сложных крупногабаритных деталях трущиеся поверхности должны быть упрочнены таким образом, чтобы сопротивляемость изнашиванию обеспечивала межремонтный ресурс агрегата. В том случае, когда этого достигнуть нельзя, конструкция детали должна предусматривать

легко сменяемые элементы, подверженные изнашиванию (втулки, вкладыши, гильзы цилиндров и др.).

3. Для всех деталей, работающих на износ, заводами-изготовителями должны быть установлены ремонтные (допустимые) и предельные размеры. При этом для деталей, подлежащих расточке (или перешлифовке) под очередной ремонтный размер, предельный размер необходимо устанавливать из условий обеспечения требуемой жесткости. Соблюдение этих требований особенно важно для таких деталей, как блоки цилиндров, тормозные барабаны и т.д., толщина стенок которых уменьшается и, следовательно, ослабляется жесткость.

4. Детали, узлы, агрегаты, ресурс которых меньше межремонтного ресурса автомобиля, должны быть сконструированы так, чтобы к ним был обеспечен хороший доступ для контрольных и регулировочных работ, а при достижении предельного износа – для быстрой замены.

5. Конструкция автомобиля должна обеспечить проведение регулировочных, крепежных и других работ ТО и ТР с наименьшими затратами времени и средств.

6. При конструировании должна быть предусмотрена возможность быстрого отыскания отказов и неисправностей, возникающих в различных узлах и агрегатах, свободный доступ к ним и легкость их полной разборки.

7. В целях обеспечения демонтажа деталей с прессовой или переходной посадкой в их конструкции целесообразно предусмотреть специальные приливы, пазы или резьбовые отверстия, позволяющие при разборке применять простейший демонтажный инструмент.

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 системы питания двигателя (рис. 5.5, а), например, включающий топливозаборную трубку 1 с сетчатым фильтром, фильтр грубой очистки 2 и фильтр тонкой очистки 3, показывает, что при засорении (отказе) любого из них нарушается подача топлива. Такое соединение фильтров следует считать последовательным. Если вероятность безотказной работы каждого из фильтров равна p_1 , p_2 , p_3 , то вероятность безотказной работы системы очистки топлива в целом определяется из выражения

$$P = p_1 p_2 p_3. \quad (5.1)$$

Система смазки двигателя кроме масляного насоса 6 включает в себя также 3 фильтра: маслозаборника 4, тонкой очистки 5 и центробежной очистки 7 (рис. 5.5, б). Фильтры работают независимо один от другого, и засорение любого из них не отражается на работе остальных. Такое включение фильтров следует считать параллельным. Вероятность безотказной работы фильтров при такой системе их соединения определяется по формуле

$$P = 1 - (1 - p_4)(1 - p_5)(1 - p_7), \quad (5.2)$$

где p_4, p_5, p_7 – вероятности безотказной работы фильтров маслозаборника, тонкой очистки и центробежной очистки соответственно.

Анализ последней формулы показывает, что параллельное соединение элементов значительно повышает безотказную работу, а следовательно, и надежность всей системы. Поэтому параллельное включение элементов системы является основой весьма важного метода повышения надежности – структурного резервирования.

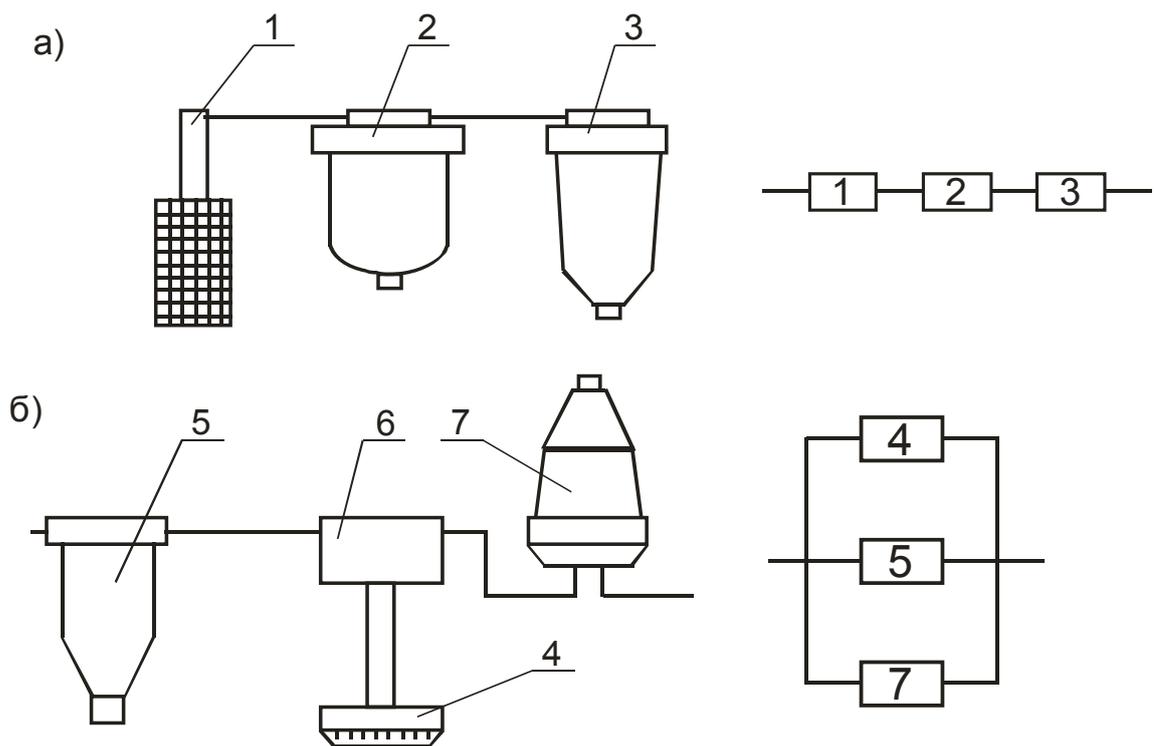


Рис. 5.5. Схемы соединения фильтров:
а – в системе питания; б – в системе смазки

Резервирование – это метод повышения надежности объекта введением избыточности, т.е. дополнительных средств и возможностей сверх

минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. Если избыточность достигается использованием дополнительных элементов структуры объекта, то такое резервирование называют структурным.

При структурном резервировании конструктивные элементы могут быть *основными* и *резервными*. Основным называют элемент структуры объекта, максимально необходимый для выполнения объектом заданных функций. Резервный элемент предназначается для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Использование структурной избыточности ведет к усложнению системы, её удорожанию. Поэтому к такому виду резервирования прибегают в системах, отказы которых приводят к аварийным ситуациям. В автомобильной технике это, в основном, рулевые управления и тормозные системы.

Отказы тормозных систем автомобиля стоят на первом месте среди наиболее тяжелых по своим последствиям, так как приводят в большинстве случаев к серьезным дорожно-транспортным происшествиям. По этой причине в тормозной системе широко применяются структурное и другие виды резервирования.

На автомобиле, как правило, имеются две основные тормозные системы – рабочая и стояночная. Рабочая тормозная система включает две подсистемы – тормоза передних 1 и задних 2 колес (рис. 5.6). Примем условно вероятности безотказной работы подсистем $P_1 = 0,9$, $P_2 = 0,9$ и рассмотрим основные схемы рабочей тормозной системы.

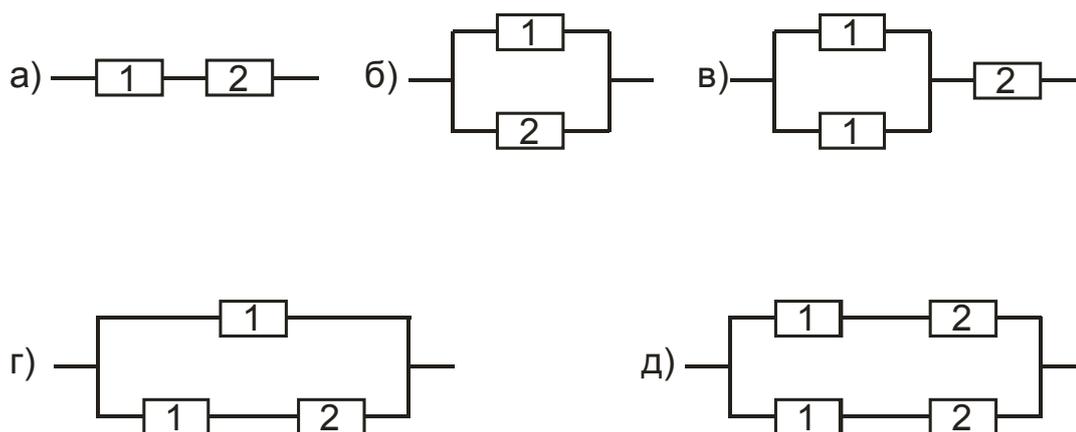


Рис. 5.6. Принципиальные схемы тормозных систем с резервированием различных подсистем

Тормозная система с одним контуром (рис.5.6, а) включает в себя обе подсистемы, соединенные последовательно. Вероятность безотказной работы невысока и составляет

$$P_a = P_1 P_2 = 0,81.$$

Для повышения надежности предлагается введение двухконтурной системы (рис. 5.6, б), в которой подсистемы 1 и 2 включены параллельно. В этом случае

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

Очевидный недостаток этой системы состоит в том, что отказ любой подсистемы снижает эффективность торможения. Можно поступить иначе. Сохранить в качестве основной системы тормозные механизмы всех колес и ввести дополнительную подсистему передних или задних тормозов. Эта дополнительная подсистема может быть включена параллельно одной из подсистем (рис. 5.6, в) или параллельно всей системе (рис. 5.6, г). В этих случаях вероятности безотказной работы определяются из выражений:

$$P_в = [1 - (1 - P_1)^2]P_2 = 0,891;$$

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

Преимущество схемы (рис. 5.6, г) состоит в том, что надежность тормозной системы выше. При отказе подсистемы 2 тормозная система, выполненная по этой схеме, сохраняет работоспособность, а выполненная по схеме (рис. 5.6, в), частично теряет её.

Схема (рис. 5.6, д) с резервированием системы в целом имеет то преимущество, что при отказе любого элемента это не отражается на тормозных качествах автомобиля. Однако по надежности такая схема общего резервирования несколько уступает разделительному резервированию, т.е.

$$P_д = 1 - (1 - P_1 P_2)^2 = 0,964 \text{ по сравнению с } P_г = 0,981.$$

Таким образом, метод резервирования элементов и систем при проектировании машин существенно повышает их надежность.

5.2. Обеспечение надежности машин при их производстве

В общем комплексе проблем обеспечения надежности важное значение имеет этап изготовления и доводки машин.

Доводкой конструкции машины по параметрам надежности называется комплекс неоднократно повторяющихся процессов: испытания – доработка конструкторской документации по результатам испытаний – изготовление новых элементов конструкции. Если проектные параметры надежности не достигаются, проводят доработку конструкции и доводочные

испытания машины, позволяющие оценить влияние вносимых в конструкцию и технологию изготовления изменений для повышения надежности и качества машины.

Доводку, как начальный этап изготовления машины, следует начинать с изготовления экспериментального образца в целях проверки не только её функционального назначения, но и всего комплекса задач по обеспечению надежности, включая получение полной и достоверной информации о конструкторских и технологических недостатках машины, о возникающих в процессе испытаний неисправностях и отказах их элементов. Эта информация поступает в лабораторию надежности предприятия, где подвергается тщательному изучению и анализу, по результатам которых устанавливают наиболее вероятные причины отказов и осуществляют доработку конструкторской и технологической документации.

Одной из составных частей этапа доводки машины является обработка технологических процессов, обеспечивающих необходимый ресурс элементов конструкции – *технологическое обеспечение надежности машин*.

Под технологическим обеспечением надежности машин понимается стабильное обеспечение в процессе серийного производства параметров надежности и качества машин, достигнутых при изготовлении опытного образца и установочной партии. Надежность машин при их серийном производстве обеспечивается за счет следующих основных мероприятий:

- стабильности технологических процессов изготовления каждого элемента конструкции, сборки отдельных узлов, агрегатов и машины в целом;
- входного контроля поступающих материалов и комплектующих;
- максимального снижения или вообще исключения вредной технологической наследственности, возникающей в технологических процессах изготовления элементов конструкции машин;
- контроля качества и надежности продукции в процессе её изготовления.

Стабильность технологических процессов определяется гарантированным обеспечением необходимой точности и качества изготовления деталей, сохранением свойств материалов, технологической надежностью применяемого оборудования.

Точность изготовления деталей, которая определяется точностью геометрических размеров рабочих поверхностей и их взаимного располо-

жения, зависит, прежде всего, от уровня используемого оборудования, степени автоматизации производственных процессов. С повышением точности изготовления уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает долговечность автомобилей.

Существенное влияние на надежность машин, их узлов и агрегатов оказывает и качество рабочих поверхностей деталей, их шероховатость и макрогеометрия. По данным ряда исследований получены, например, следующие зависимости интенсивности изнашивания деталей от шероховатости (рис. 5.7).

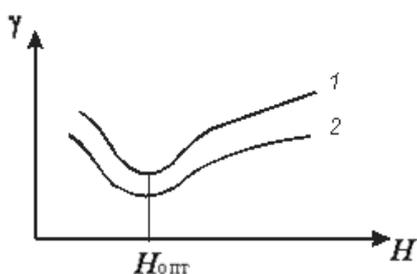


Рис. 5.7. Зависимости интенсивности изнашивания γ деталей от шероховатости H :
1 – чугун по стали;
2 – бронза по стали

Из графика видно, что минимальное значение интенсивности изнашивания соответствует какой-то определенной величине шероховатости $H_{\text{опт}}$. При $H > H_{\text{опт}}$ интенсивность изнашивания возрастает. Возрастает она и при $H < H_{\text{опт}}$ так как при трении слишком гладких поверхностей ухудшаются условия смазки (она плохо удерживается) и возникают условия для молекулярного схватывания.

В связи с этим одной из основных задач машиностроения является доведение шероховатости рабочих поверхностей до величин, близких к $H_{\text{опт}}$.

Значительное влияние на эксплуатационную надежность узлов и агрегатов машин оказывает и макрогеометрия деталей, т.е. различные отклонения от геометрической формы. Например, для двигателя ЯМЗ были получены следующие зависимости износа гильз цилиндров от их овальности и конусности (рис. 5.8).

Кроме износостойкости точность и качество изготовления деталей оказывает существенное влияние на выносливость, сопротивление ударным нагрузкам, коррозионную стойкость.

Высокие характеристики качества поверхностей деталей достигаются применением на заключительных стадиях их изготовления таких методов обработки, как: тонкое шлифование, хонингование, суперфиниширо-

вание (сверхдоводка), полирование. Такие операции необходимы не только для уменьшения шероховатости, но и для удаления тонкого дефектного поверхностного слоя с низкими физико-механическими свойствами. Точность изготовления деталей, элементов конструкции машин должна контролироваться с использованием высокоточной измерительной аппаратуры и по методикам, которые обосновываются в операционной технологической документации.

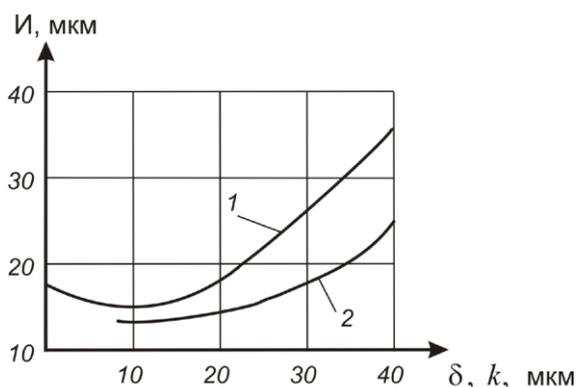


Рис. 5.8. Зависимости износа I от значений овальности δ (кривая 1) и конусности k (кривая 2) гильз цилиндров

Средства контроля могут иметь разный уровень автоматизации – от визуальных сигналов для наладки оборудования, изменения режимов его работы, до самонастраивающихся систем. Системы активного контроля, особенно с самонастройкой, являются важным звеном автоматизированного производства с управлением параметров качества изделия.

Сохранение свойств материалов элементов конструкции на этапе серийного производства обеспечивается путем постоянного материаловедческого контроля и контроля качества за термической обработкой деталей. Контроль за качеством термической обработки принципиально важен для высокоуглеродистых сталей и легированных сплавов.

Технологическая надежность оборудования – это его свойство сохранять в заданных пределах и во времени значения показателей, определяющих качество осуществления технологического процесса. К показателям качества технологического оборудования относятся его геометрическая точность, жесткость, виброустойчивость и т.д., которые определяют точность обработки, качество поверхности и физические характеристики материала обрабатываемой детали.

В процессе эксплуатации технологическое оборудование постепенно теряет свои начальные характеристики, что приводит к снижению качественных показателей технологического процесса. Восстановление работоспособности при этом связано, как правило, с большими временными и материальными затратами. Постепенное ухудшение начальных характеристик оборудования приводит к уменьшению точности изготовления, росту вероятности получения некачественной продукции, снижению надежности изготавливаемой машины.

Входным контролем называют комплекс мероприятий по сплошному или выборочному контролю качества материалов, полуфабрикатов и заготовок. Несмотря на то, что все поступающие материалы имеют сопроводительные документы о выполнении требований ГОСТов и технических условий на них, в большинстве случаев в этих документах не содержится информация для оценки надежности элементов машин. В связи с этим одним из условий обеспечения высокой надежности ответственных элементов конструкции машин является входной контроль различных характеристик исходных материалов (прочности, твердости и т.д.).

Для ответственных деталей, изготавливаемых из профильного проката без механической обработки, необходимо контролировать, кроме того, геометрические характеристики и отсутствие внутренних дефектов (трещин, засорений, рыхлот и т.д.) методами неразрушающего контроля. В литых заготовках и полуфабрикатах со сварными швами входной контроль должен быть направлен также на выявление литейных дефектов (пустот, трещин и т.д.) методами рентгеноскопического анализа, цветной, люминесцентной и ультразвуковой дефектоскопии.

Технологическая наследственность возникает в технологических процессах изготовления деталей. Основную роль в формировании показателей качества выпускаемых изделий играют финишные операции процесса, однако часть свойств передаются и с промежуточных операций их изготовления. Явление переноса свойств объекта от предшествующих операций к последующим называется *технологическим наследованием*.

Носителями технологической наследственности являются материал детали и её геометрические формы. Наследуются такие дефекты изготовления заготовок, как несплошность материала деталей (пустоты, раковины, трещины), возникновение непредсказуемых химических соединений, изменение заданного химического состава.

При механической обработке поверхности детали могут передаваться следующие виды технологической наследственности:

- непрогнозируемое изменение микро- и макрорельефа, снижающие износостойкость;
- возникновение остаточных напряжений;
- образование наклепа;
- внедрение инородных элементов в поверхность трения (например, абразивных зерен);
- непрогнозируемое изменение геометрии элементов конструкции.

В процессе изготовления изделия носители наследственной информации как бы проходят различные барьеры, задерживаясь на них частично или полностью. Существенным барьером для дефектов заготовок, например, служат такие методы их изготовления, как литье под вакуумом, принудительное заполнение форм расплавом, формирование объемных деталей в режиме сверхпластичности и др. Барьером на пути вредных технологических последствий при механической обработке поверхностей деталей являются:

- алмазное выглаживание поверхности;
- «залечивание» поверхностных дефектов и подповерхностных повреждений методом термоциклической обработки;
- детонационное и плазменное напыление специальных покрытий на поверхность деталей;
- пластическое деформирование путем гидродробеструйной обработки и т.д.

Технологическая наследственность в большинстве случаев оказывает отрицательное влияние на показатели качества и является побочным процессом при обработке изделия. Поэтому стремятся исключить передачу погрешностей обработки с операции на операцию и сделать их как бы независимыми в технологическом отношении. Наиболее рациональным будет такой технологический процесс, где уже на начальных операциях изготовления происходит практически полная ликвидация отрицательных свойств и они не наследуются финишными операциями.

Контроль качества продукции в процессе её изготовления является одним из основных методов обеспечения надежности машин. Под контролем понимается проверка соответствия продукции или процесса, от которого зависит её качество, установленным техническим требованиям. Поэтому контроль может относиться как к оценке качественных и количественных

венных характеристик свойств продукции, так и к контролю режимов, характеристик и параметров технологического процесса.

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.

Оценка уровня качества продукции – необходимый, но недостаточный вид статистического контроля при изготовлении машин. Статистические методы контроля используются и для оценки параметров технологического процесса. Контролируются характеристики качества оборудования, технологической оснастки и инструмента, проверяются методы их наладки, а также подвергаются контролю параметры изготавливаемых изделий.

Принципиальная разница по сравнению с контролем качества продукции в этом случае заключается в том, что анализируются процесс и тенденции развития или стабилизации технологического процесса, близость его параметров к граничным значениям и т.д.

Для повышения надежности изделий в современном машиностроении широко используются различные *упрочняющие технологии*. За счет введения в технологические процессы изготовления специальных видов обработки повышаются износостойкость, усталостная прочность и коррозионная стойкость изделий. К ним, прежде всего, относятся различные процессы термической и химико-термической обработки, упрочняющие технологии, основанные на пластическом деформировании поверхностей, нанесение износостойких и коррозионностойких покрытий.

Термическая обработка деталей – один из самых эффективных и распространенных методов их упрочнения. В автомобилестроении получили применение следующие виды термообработки:

- объемная закалка стальных деталей с последующим отпуском;
- поверхностная закалка стальных и чугуновых деталей с нагревом токами высокой частоты
- термическая обработка сталей пониженной прокаливаемости для контурного упрочнения деталей сложного профиля.

Химико-термическая обработка позволяет изменять химический состав поверхностных слоев металла с целью повышения служебных свойств деталей. Наибольшее распространение для упрочнения деталей получили:

цементация, азотирование, нитроцементация, диффузная металлизация (хромирование, борирование, алитирование, силицирование).

Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием применяется для повышения долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок или коррозионных средах и имеющих концентраторы напряжений. Предел выносливости деталей в результате пластического деформирования поверхностных слоев увеличивается во многих случаях в 1,5 - 2 и более раз, увеличивая тем самым в несколько раз сроки службы деталей.

Повышение усталостной прочности при наклепе обусловлено изменением формы и размеров кристаллических зерен, возникновением благоприятных сжимающих напряжений. Вместе с тем в результате наклепа повышается твердость рабочих поверхностей и сопротивляемость их износу и коррозии, уменьшается шероховатость поверхностей. Такие детали, как пружины, рессоры, шестерни, шатуны и другие детали подвергают наклепу дробеструйной обработкой. Коленчатые валы, оси, полуоси и поворотные цапфы весьма эффективно упрочняют обкаткой роликами и шариками. Рабочие поверхности втулок, верхних головок шатунов, гильз цилиндров, отверстий в корпусах коробок передач и задних мостов обрабатываются раскаткой и дорнованием.

Чистовая обработка деталей методом пластического деформирования обеспечивает высокую чистоту обрабатываемой поверхности и позволяет избежать возникновения концентраторов напряжения снятием неровностей при обкатывании, раскатывании, алмазном выглаживании и т.д. В результате улучшаются все механические характеристики поверхностного слоя (твердость, пределы текучести и упругости).

В машиностроении широко применяются также различные антифрикционные и антикоррозионные покрытия, нанесенные методами наплавки или металлизации, напылением, электрохимическим, или другими способами. С помощью таких методов поверхностному слою придают практически любые свойства, независимо от исходного материала. Широко распространены также методы гальванического наращивания: хромирование, никелирование, борирование, цинкование, кадмирование.

В табл. 5.2 приведены данные о возможности повышения ресурса деталей машин перспективными методами упрочнения их поверхностей.

Таблица 5.2

Методы упрочнения рабочих поверхностей	Результаты упрочнения
1. Поверхностно-пластическое деформирование деталей, работающих при циклических нагрузках	Повышение предела выносливости в 2 - 2,5 раза за счет образования остаточных сжимающих напряжений
2. Создание макрорельефов пневмогидроструйной обработкой или алмазной выглаживающей накаткой	
3. Ионно-плазменная и химико-термическая обработка поверхности (ионное азотирование, ионно-вакуумная цементация)	Увеличение ресурса деталей в 1,2 - 1,8 раза
4. Нанесение специальных покрытий на рабочие поверхности плазменным, детонационным и другими способами	Повышение ресурса деталей, подверженных изнашиванию и контактными нагрузкам, в 1,5 - 2 раза
5. Обработка поверхностей лазерными лучами	Улучшение коррозионной стойкости и износостойкости поверхностей в 1,4 - 1,6 раза

5.3. Обеспечение надежности машин в эксплуатации

Эффективность использования машин по назначению в значительной мере определяется их надежностью, в связи с чем задачи обеспечения надежности занимают важное место среди общих задач эксплуатации.

Эксплуатация автомобиля, например, длится несколько лет и включает транспортирование, хранение, транспортную работу, техническое обслуживание и ремонт. При этом следует учитывать, что эксплуатация является более длительным, трудоемким и дорогим процессом, чем производство. Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт за весь период эксплуатации в 3 - 4 раза превышают стоимость автомобиля. Поэтому поддержание и восстановление надежности в эксплуатации является важнейшей составной частью общей системы обеспечения надежности, предыдущими этапами которой являются проектирование и производство, где закладываются и обеспечиваются исходные показатели надежности.

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. 5.9).

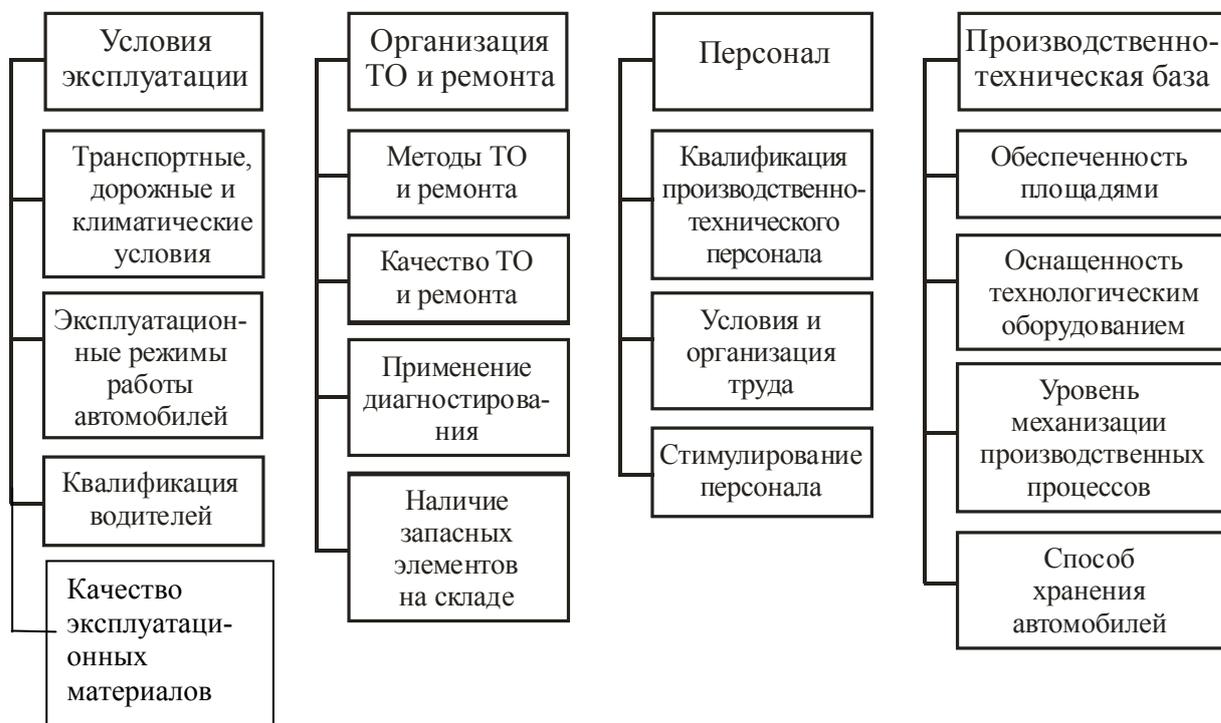


Рис. 5.9. Факторы, влияющие на показатели надежности автомобилей в эксплуатации

5.3.1. Условия эксплуатации автотранспортных средств

Дорожные и климатические условия

Дорожные условия характеризуются технической категорией дороги, видом и качеством дорожного покрытия, а также рельефом местности.

За последние годы значительно повышено качество смазочных материалов за счет целого пакета сложных и совершенных присадок (антифрикционных, антиокислительных, вязкостных, моющих и т.д.), которые резко снижают интенсивность изнашивания, защищают от отложений и коррозии, создают нормальные условия работы в экстремальных режимах. К настоящему времени созданы легкотекучие моторные масла с высокой термостабильностью и прокачиваемостью, обеспечивающие легкий запуск холодного двигателя.

Использование таких масел существенно повышает ресурс двигателя, так как на запуск и последующий прогрев приходится до 75 % его суммарного износа. На рис. 5.13 показаны результаты испытаний изнашивания хромированного поршневого кольца до предельного состояния на минеральном и синтетическом маслах.

На стадии приработки скорость изнашивания постепенно снижается. Как видно из рисунка период приработки на синтетическом масле заканчивается раньше – 15 тыс. км, чем на минеральном – 20 тыс. км, а износ кольца за этот период значительно меньше.

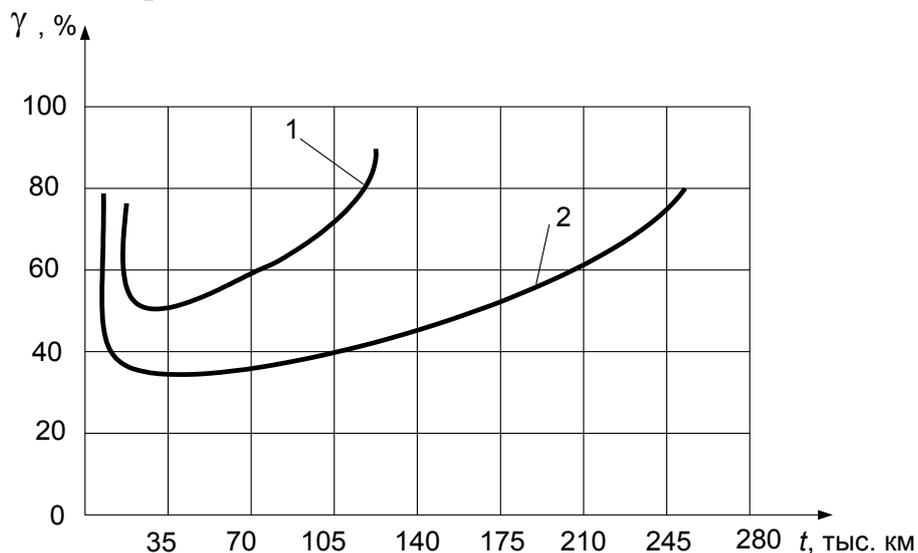


Рис. 5.13. Кривые изнашивания хромированного поршневого кольца:
1 - на минеральном масле; 2 - на синтетическом масле;
 γ - относительный износ, %

На стадии установившегося (нормального) изнашивания, когда детали окончательно приработались, процесс протекает с постоянной скоростью до определенной наработки (на минеральном масле до 100 тыс. км, на синтетическом – до 250 тыс. км). На этих наработках скорость изнашивания резко возрастает, и процесс переходит в стадию аварийного износа, т.е. кольцо достигло предельного состояния. Таким образом, при работе на синтетическом масле ресурс поршневого кольца в 2,5 раза выше, чем на минеральном.

С ростом эксплуатационных свойств масла растет степень защиты двигателя, поэтому после гарантийного пробега для снижения интенсивности изнашивания деталей можно использовать масла с более высокими эксплуатационными свойствами. Однако, следует иметь в виду, что использование более качественных масел не увеличивает сроки их замен, а гарантирует только повышенную степень защиты деталей двигателя от изнашивания.

5.3.2. Организация ТО и ремонта

Основной задачей системы эксплуатации машин является поддержание их технического состояния и надежности на уровне, достаточном для осуществления ими заданных функций.

На автомобильном транспорте для решения этой задачи создана и функционирует планово-предупредительная система технического обслуживания (ТО) и ремонта, которая предусматривает три стратегии ее обеспечения:

I – поддержание заданного уровня исправности или работоспособности (ТО);

II – восстановление утраченной работоспособности (ремонт);

III – комбинация I и II стратегий (ТО и ремонт).

Техническое обслуживание представляет собой комплекс работ для поддержания исправности или только работоспособности объекта в процессе его эксплуатации, направленных на решение следующих основных задач:

- предупреждение (профилактика) отказов и неисправностей;
- снижение темпа изнашивания и отдаление момента достижения объектом предельного состояния (т.е. увеличение ресурса);
- обеспечение требуемого уровня вероятности безотказной работы.

Снижение темпа изнашивания увеличивает наработки конструктивных элементов на отказ, повышает показатели безотказности, снижает простой машин в ремонтах, в том числе и в периоды между обслуживаниями. Все это уменьшает удельные затраты на устранение отказов, увеличивает ресурсы машин, если даже их предельное состояние определяется не только отказами корпусных и других основных конструктивных элементов, но и снижением эффективности, затратами на устранение отказов и неисправностей.

Техническое обслуживание является профилактическим мероприятием, проводимым принудительно в плановом порядке, как правило, без разборки и снятия с автомобиля агрегатов, узлов и деталей.

Высокая эксплуатационная надежность автомобилей, как главная цель, стоящая перед технической службой автотранспортных предприятий, обеспечивается решением целого ряда организационных, технических и технологических задач при производстве ежедневного (ЕО), первого (ТО-1), второго (ТО-2), сезонного (СО) обслуживаний и ремонте.

Ремонт предназначен для восстановления исправного или работоспособного состояния изделия и его элементов, а также устранения отказов

и неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации. В соответствии с характером и назначением работ ремонт подразделяется на капитальный и текущий (ТР).

Капитальный ремонт предназначен для регламентированного восстановления изделий, потерявших работоспособность, до нормативного уровня. Для автотранспортных средств ресурс восстановленных изделий должен быть не менее 80 % от ресурса нового. Капитальный ремонт изделий предусматривает их полную разборку, дефектацию, восстановление или замену деталей с последующей сборкой, регулировкой и испытанием.

Агрегаты автомобилей направляются в капитальный ремонт, когда базовые и основные детали достигли предельного состояния, и их работоспособность не может быть восстановлена проведением ТР. Базовые и основные детали обеспечивают выполнение функциональных свойств агрегатов и определяют их эксплуатационную надежность. Поэтому их восстановление при капитальном ремонте должно обеспечивать уровень качества, близкий или равный качеству новых изделий.

При капитальном ремонте обеспечивается также восстановление до уровня новых изделий или близкого к нему: зазоров и натягов, взаимного расположения деталей (осей, плоскостей и т.д.), микро- и макрогеометрии рабочих поверхностей, структуры и твердости металла.

Текущий ремонт предназначен для обеспечения работоспособного состояния автотранспортных средств с восстановлением или заменой отдельных их агрегатов, узлов и деталей (кроме базовых), достигших предельного состояния. ТР должен обеспечивать безотказную работу отремонтированных агрегатов, узлов и деталей на пробеге, не меньшем, чем до очередного 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 исправные, взятые из оборотного фонда.

Эффективность ТО и ремонта автомобилей определяется степенью выполнения заданных объемов и качества работ, ростом производительности труда, снижением затрат на поддержание подвижного состава в технически исправном состоянии. Оценка уровня качества выполнения ТО и ремонта осуществляется с помощью ряда технико-экономических показателей. В практической деятельности автотранспортных предприятий используются следующие показатели.

1. *Число заявок на текущий ремонт.* Число заявок на ТР может определяться за период между очередными ТО или за определенную наработку, например, за 1000 км

$$n_{зр} = \frac{\sum n_{зр} \cdot 1000}{T}, \quad (5.4)$$

где $n_{зр}$ – число заявок на ремонт на 1000 км пробега; $\sum n_{зр}$ – общее число заявок на ремонт (по автомобилю, агрегату, предприятию); T – общая наработка автомобиля (автомобилей) за рассматриваемый период.

2. *Нарботка на отказ (п. 1.3.1)*

$$t_n = \frac{T}{\sum n_{зр}}. \quad (5.5)$$

Очевидно, чем выше уровень организации ТО и ремонта на предприятии и, соответственно, их качество, тем меньше число заявочных ремонтов $n_{зр}$ и больше наработка на отказ t_n .

В дополнение к этим двум показателям при более глубоком анализе качества ТО и ремонта могут использоваться: число опозданий с выездом на линию и число преждевременных возвратов автомобилей с линии из-за неисправностей; число отказов автомобилей или суммарное время их простоя на линии из-за некачественного выполнения ТО и ремонта. Все эти показатели рассматриваются за определенную наработку или период времени. К показателям качества относится и величина пробега агрегатов или автомобилей до предельного состояния.

Одним из важнейших показателей качества деятельности всей технической службы АТП, обобщающим как различные условия работы автомобилей, так и разный уровень выполнения ТО и ремонта, является *коэффициент технической готовности автомобилей* α_T . Он определяет долю рабочего времени, в течение которого автомобиль (парк) исправен и может быть использован в транспортном процессе. Величина коэффициента технической готовности определяется:

$$\text{- для одного автомобиля} \quad \alpha_T = \frac{D_э}{D_э + D_p}; \quad (5.6)$$

$$\text{- для парка автомобилей} \quad \alpha_T = \frac{A D_э}{A D_э + A D_p}, \quad (5.7)$$

где $D_э$, D_p – число дней нахождения автомобиля в эксплуатации и ремонте соответственно; A – число автомобилей в парке.

Таким образом, показатели качества ТО и ремонта оценивают безотказную работу автомобиля (агрегата, системы) в течение определенной наработки, т.е. уровнем эксплуатационной надежности обслуживаемых объектов.

5.4. Техническая диагностика машин

5.4.1. Основные понятия. Системы диагностирования

Широкий диапазон условий и режимов эксплуатации, а также вариация начальных показателей качества машины приводят к значительной дисперсии ее наработок до предельного состояния. Поэтому весьма важно иметь методы и средства для оценки технического состояния машины, т.е. получение индивидуальной информации о скрытых и назревающих отказах, остаточном ресурсе, причинах нарушения работоспособности и т.п. Средством получения такой информации является техническая диагностика.

Технической диагностикой называется отрасль знаний, изучающая признаки неисправностей машин, методы, средства и алгоритмы определения их технического состояния без разборки. Техническая диагностика непосредственно примыкает к теории надежности, так как главной ее целью является своевременное обнаружение неработоспособного состояния машины, прогнозирование остаточного ресурса, что, в конечном счете, направлено на повышение надежности и эффективности эксплуатации машины.

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 величин, характеризующих его состояние, и сопоставления их с нормативами. Диагностирование не является самостоятельным технологическим процессом, оно является элементом системы ТО и ремонта, обеспечивающим индивидуальной информацией о техническом состоянии объекта. Наличие такой информации позволяет оптимизировать режимы регламентного контроля, оперативно выявлять потребность объекта в ремонте и ТО, проверять ка-

чество их выполнения, т.е. комплексно управлять техническим состоянием.

Под управлением техническим состоянием объекта подразумевается комплекс технических воздействий, направленных на предупреждение отказов и восстановление значений параметров технического состояния до требуемого уровня (рис. 5.14).

Из схемы видно, что при эксплуатации объекта под влиянием факторов внешней среды происходит изменение его технического состояния, которое восстанавливается в процессе ТО или ремонта. Внедрение диагностирования в этот процесс позволяет уточнить объемы регламентных работ применительно к данному объекту, исключить затраты на его преждевременную профилактику и текущий ремонт, полнее использовать заложенный в него потенциальный ресурс.

Диагностирование является качественно более совершенной формой контрольных работ и отличается от последних следующими признаками:

- объективностью и достоверностью оценки технического состояния сложных объектов без их разборки;
- возможностью определения технического состояния по выходным параметрам;
- появлением условий для прогнозирования технического состояния объекта, его остаточного ресурса.

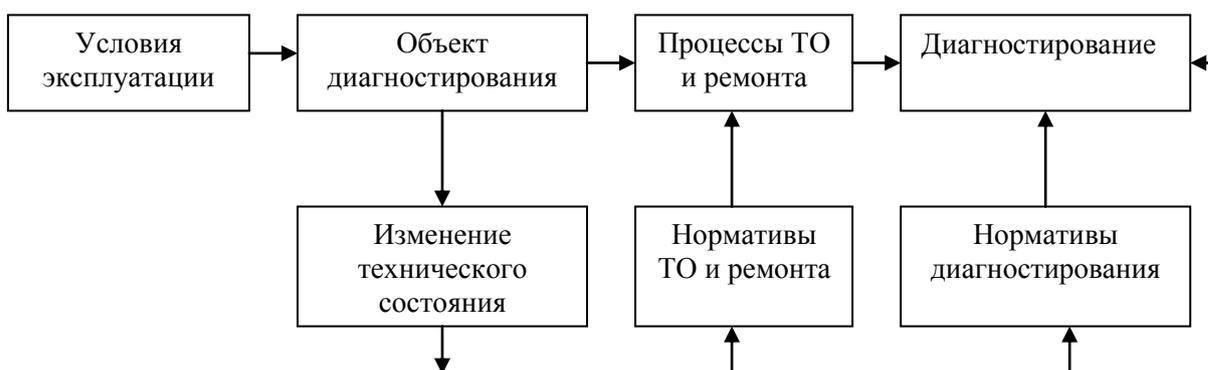


Рис. 5.14. Схема управления техническим состоянием объекта в эксплуатации

Результат диагностирования, т.е. заключение о техническом состоянии, называется *диагнозом*. При диагностировании машин возможны различные варианты формирования диагноза. В случае положительного результата диагностирования, т.е. когда объект находится в работоспособном

состоянии желательно иметь информацию о запасе его исправной работы (прогнозирование остаточного ресурса). При отрицательном результате (объект неработоспособен) - заключение о конкретных отказах и неисправностях.

В процессе диагностирования в общем случае принимают участие объект диагностирования, технические средства диагностирования и человек-оператор, которые в совокупности образуют систему диагностирования.

Функции человека-оператора изменяются в зависимости от степени автоматизации процесса диагностирования и от того, какое (рабочее или тестовое) диагностирование выполняется.

Системы диагностирования делятся на *функциональные*, когда диагностирование проводят в процессе работы объекта, и *тестовые*, когда при измерении диагностических параметров работу объекта воспроизводят искусственно. Различают системы *универсальные*, предназначенные для нескольких различных диагностических процессов, и *специальные*, обеспечивающие только один из них.

Диагностические системы могут быть *общими*, когда объектом является изделие в целом, а назначением – оценка его состояния на уровне «годно - негодно» и *локальными*, предназначенными для 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 обработка и выдача диагностического заключения (диагноза).

Средствами диагностирования (автомобиля) служат специальные приборы и стенды. Они 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.

Внешние средства диагностирования могут быть стационарными (стенды тормозные, для проверки 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 (блоки питания, электронно-вычислительные приборы, индикацию) для обработки диагностических сигналов и непрерывного или достаточно частого измерения параметров технического состояния. Простейшие средства встроенного диагностирования реализуются в виде традиционных приборов щитка водителя. Более сложные средства встроенного диагностирования позволяют водителю постоянно контролировать состояние тормозных систем, расход топлива, токсичность отработанных газов и др.

Недостатком сложных средств встроенного диагностирования является необходимость оборудования каждого автомобиля дорогостоящей аппаратурой.

Существуют диагностические средства смешанного типа. В таких комплексах используются встроенные датчики с выводами диагностического сигнала к централизованному штепсельному разъему и внешние средства для снятия электрических сигналов, их измерения, обработки и индикации полученной информации.

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.

Алгоритм диагностирования представляет собой структурное изображение рациональной последовательности диагностических, регулировочных и ремонтных операций. Он определяет вывод объекта на тестовый режим, постановку первичного диагноза, переход к следующему элементу, регулировочные и ремонтные операции, повторные и заключительные проверки. Алгоритм строят с учетом особенностей объекта и средств диагностирования и оптимизируют (сравнивая с другими вариантами) по экономическому критерию.

Окончательную детализацию процедуры диагностирования дает *технологическая карта*, которая включает в себя порядковые номера операций и их трудоемкость, применяемое оборудование, исполнителей, коэффициенты повторяемости.

5.4.2. Выбор диагностических параметров

Техническое состояние машин (агрегатов, узлов) определяется, безусловно, структурными параметрами, однако в большинстве случаев, невозможно осуществить их контроль без разборки. Поэтому для этой цели используются *диагностические параметры* – косвенные величины, связанные со структурными параметрами и несущие достаточную информацию о техническом состоянии объекта.

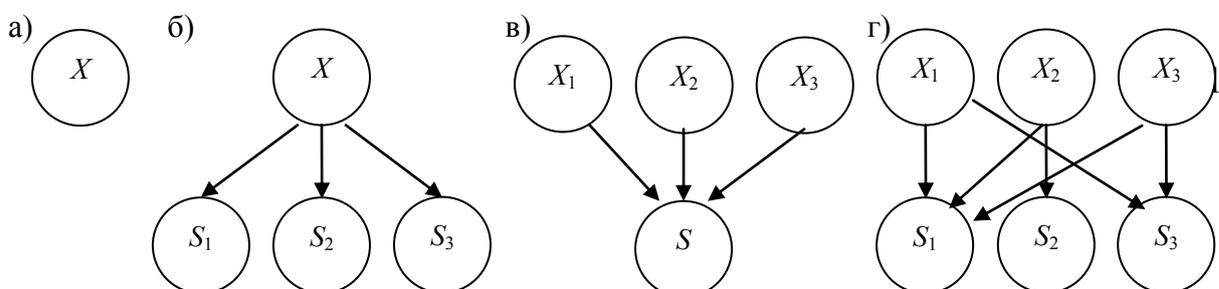
В качестве диагностических параметров при оценке технического состояния автомобилей используются:

- параметры рабочих процессов (мощность, тормозной путь, расход топлива и т.д.);
- параметры сопутствующих процессов (вибрации, шумы, нагрев и т.п.);
- геометрические параметры (зазоры, свободный ход, люфты, несоосности и др.).

В основу выбора диагностических параметров должны быть положены технические, экономические или технико-экономические критерии. К техническим критериям относятся: срок службы объекта до предельного состояния, уровень безотказной работы, коэффициент технической готовности, информативность, точность, контролепригодность и др. Экономические критерии определяют максимум производительности или рентабельности эксплуатации. Предпочтительными являются технико-экономические критерии в виде минимизации суммарных приведенных затрат или суммарных удельных затрат на эксплуатацию, ТО и ремонт. Выбор диагностических параметров S определяется их взаимосвязью со структурными параметрами X (рис. 5.15).

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

Из всего комплекса диагностических параметров выбираются лишь те, которые удовлетворяют требованиям однозначности, стабильности, чувствительности, информативности и технологичности.



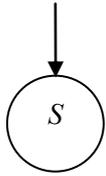


Рис. 5.15. Взаимосвязи диагностических и структурных параметров

Под однозначностью понимают соответствие каждому значению диагностического параметра только одного состояния диагностируемого объекта, т.е. в диапазоне от начального до предельного значений структурного параметра экстремум функции $S = f(X)$ отсутствует.

Стабильность диагностического параметра определяется наибольшим отклонением его величины от среднего значения при неизменных условиях измерения.

Чувствительность φ диагностического параметра характеризуется изменением его значения dS с изменением ΔX структурного параметра. Для практических целей можно пользоваться приращениями $\Delta S = f(\Delta X)$. Из рис. 5.16 следует, что при $\Delta X = \text{const}$ $\Delta S_1 > \Delta S_2$, тогда и чувствительность диагностического параметра S_1 больше чувствительности параметра S_2 , т.е. $\varphi_1 > \varphi_2$.

Информативность диагностического параметра определяется снижением исходной энтропии (т.е. неопределенности технического состояния объекта) после измерения данного диагностического параметра

$$I = H_n - H_i, \quad (5.8)$$

где H_n , H_i – неопределенность (энтропия) состояния объекта до и после измерения i -го диагностического параметра.

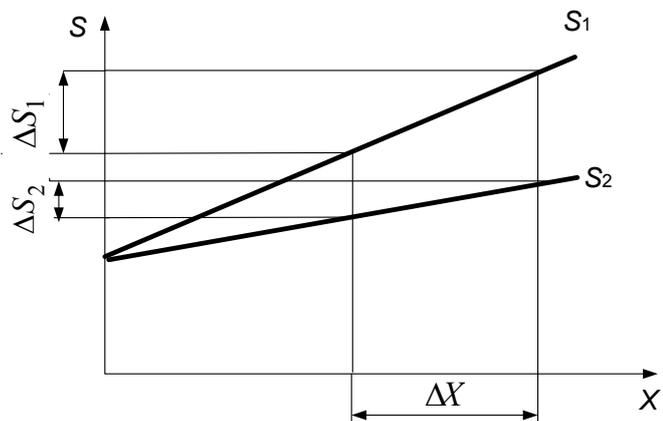


Рис. 5.16. Схема определения чувствительности диагностических параметров

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;
- выявление структурно-следственных связей диагностируемого объекта;
- разработку методики поиска неисправностей и алгоритма диагностирования.

Первый этап подробно рассмотрен в 4-м разделе данного пособия.

Кроме закономерностей изменения технического состояния механизмов и узлов объекта диагностирования необходимо обобщенное описание его наиболее важных свойств: перечень наиболее часто отказывающихся элементов, соответствующие этим элементам структурные и диагностические параметры и связи между ними. Наиболее простое логическое описание объекта диагностирования выражается его структурно-следственной моделью, разработка которой осуществляется по принципу многоуровневой цепочки, которая определяет следующие уровни поиска неисправности:

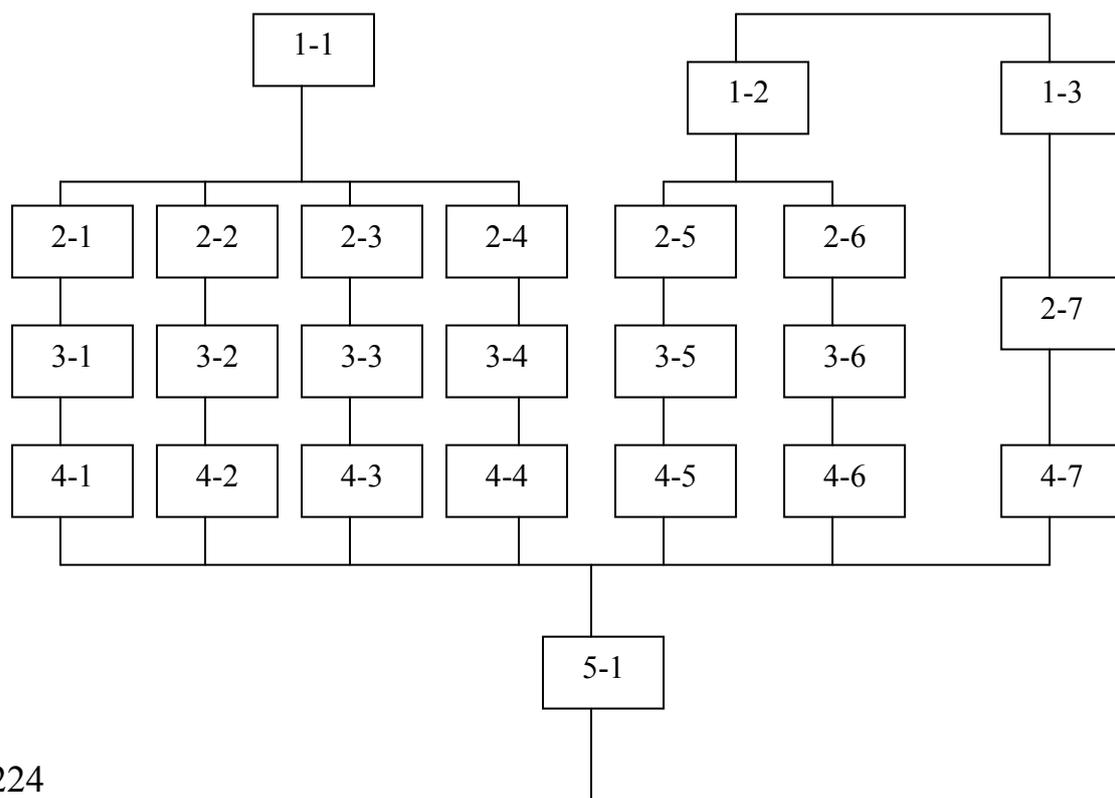
- 1 – основные узлы, из которых состоит диагностируемая система;
- 2 – сопряжения и элементы узлов, имеющих в процессе эксплуатации наибольшие износы и отклонения структурных параметров;
- 3 – структурные параметры сопряжений и элементов, определяемые на основе анализа взаимодействия элементов и сопряжений с учетом показателей эксплуатационной надежности;
- 4 – перечень возможных неисправностей объекта;
- 5 – перечень симптомов, посредством которых проявляется каждая неисправность;
- 6 – предварительный перечень всех возможных диагностических параметров, из которых выбираются только удовлетворяющие вышеизложенным требованиям.

На рис. 5.17 представлена структурно-следственная модель связей системы подвески и рулевого управления переднеприводного автомобиля семейства ВАЗ.

Для повышения эффективности процесса диагностирования следует из всех возможных проверок проводить только необходимые и в совершенно определенной последовательности по алгоритму. Строить диагностический процесс целесообразно как некоторую процедуру, в результате которой не только оцениваются значения параметров, но и происходит управление сбором информации.

Алгоритм диагностирования должен быть построен таким образом, чтобы по выбранному перечню параметров определить работоспособность системы и локализовать имеющиеся неисправности.

Локализация неисправностей, т.е. их поиск и устранение, является неотъемлемой частью технологического процесса диагностирования. Основные метрологические требования, которым должны удовлетворять методы и средства локализации неисправностей, не отличаются от требований к самому процессу диагностирования. К ним относятся: точность, достоверность, быстродействие и эффективность.



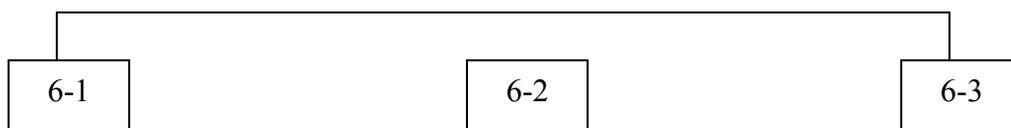


Рис. 2.4. Блок-схема структурно-следственных связей системы подвески и рулевого управления переднеприводного автомобиля семейства ВАЗ:

1-1 – передняя подвеска автомобиля; 1-2, 1-3 – рулевое управление автомобиля, состоящее из рулевого привода и рулевого механизма; 2-1 – ступичный подшипник - корпус ступицы колеса; 2-2 рычаги подвески; 2-3 – шаровой шарнир рычага подвески; 2-4 – растяжки рычагов подвески; 2-5 – рулевые тяги; 2-6 наконечники рулевых тяг; 2-7 – рейка – приводная шестерня рулевого механизма; 3-1 – увеличенный зазор в ступичном подшипнике; 3-2 – изменение длины (конфигурации) рычагов подвески; 3-5 – изменение длины рулевых тяг; 3-6 – люфт в шаровых шарнирах рулевых тяг; 3-7 – увеличенный зазор в рулевом механизме; 4-1 – механический износ поверхностей ступичного подшипника; 4-2 – деформация рычагов подвески; 4-3 – механический износ шарового пальца или ослабление пружины шаровой опоры рычага подвески; 4-4 – деформация растяжек подвески; 4-5 – деформация рулевых тяг; 4-6 – механический износ шарового пальца или ослабление пружины шарового шарнира рулевой тяги; 4-7 – механический износ рейки и приводной шестерни рулевого механизма; 5-1 – нарушение устойчивости и управляемости автомобиля; 6-1 эффективность подвески; 6-2 – отклонение углов установки колес; 6-3 – боковой увод автомобиля

Параметры шестого уровня, как это следует из рис. 5.17, позволяют оценить устойчивость и управляемость автомобиля и указывают на конкретную неисправность.

5.4.3. Нормирование диагностических параметров

Важнейшим этапом разработки системы диагностирования является определение нормативных значений диагностических параметров, количественно оценивающих техническое состояние объекта. В качестве нормативных показателей (или просто нормативов) при диагностировании автомобилей и их элементов служат: номинальное S_n , предельное S_p и допустимое S_d значения.

Номинальное значение параметра соответствует новым, технически исправным машинам, агрегатам, узлам. Предельное значение параметра соответствует такому состоянию объекта, когда его дальнейшая эксплуатация становится технически невозможной или экономически невыгодной. Допустимое значение представляет собой ужесточенную величину пре-

дельного, при которой обеспечивается заданный уровень безотказной работы на межконтрольной наработке.

В общем случае для определения нормативных значений диагностических параметров используются три метода:

- метод назначения предельного значения на основе толерантных границ (при ограниченной статистической информации);
- метод определения допустимого значения по матрице переходных вероятностей (изменение диагностического параметра по наработке носит стохастический, непрогнозируемый характер);
- метод определения нормативных значений диагностического параметра по его связи со структурным параметром.

Применение каждого из этих методов обуславливается информацией о реализациях диагностических параметров и о характере их связей с показателями работоспособности агрегата. Наибольшее распространение для диагностирования автотранспортных средств получил третий метод. Он предполагает определение нормативных значений диагностических параметров по их связям со структурными при минимизации удельных затрат на эксплуатацию, ТО и ремонт с учетом точности измерения параметра.

Формирование нормативных значений диагностического параметра при известной закономерности его изменения может быть представлено схемой (рис. 5.18).

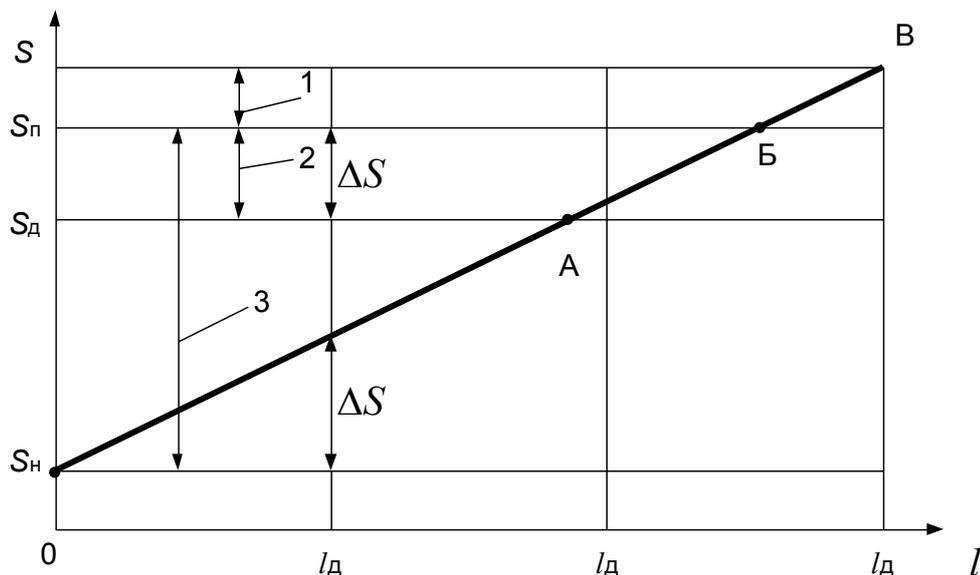


Рис. 5.18. Схема формирования диагностических нормативов при линейной реализации диагностического параметра S :

l – запас предотказного состояния; 2 – запас исправного состояния;

*З – общий запас исправной работы; А – профилактика (упреждение неисправности); Б – неисправность (упреждение отказа); В – отказ;
 I_d – периодичность диагностирования*

Начальный норматив S_n определяет исходное состояние объекта. 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.

Предельный норматив S_n устанавливается по техническим или технико-экономическим критериям, которые определяют возникновение отказа (неисправности) или экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Диагностические нормативы можно подразделить на две группы: устанавливаемые ГОСТами или рекомендуемые отраслевой технической документацией (например, ТУ заводов-изготовителей).

Нормативы, устанавливаемые ГОСТами, подлежат строгому соблюдению и их индивидуальная корректировка возможна только в сторону ужесточения. К этой группе относятся, в основном, параметры для диагностирования узлов, непосредственно влияющих на безопасность автомобиля, в т. ч. и экологическую (нормативы эффективности торможения, люфт рулевого колеса, содержание СО в отработавших газах и другие обязательные параметры).

Диагностические параметры, устанавливаемые отраслевой технической документацией, связаны с технологическими допусками структурных параметров на изготовление механизма, а также с показателями надежности и экономичности их работы (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.

Среди диагностических параметров как 1-й, так и 2-й групп имеются нормативы, несоблюдение которых приводит к дополнительным эксплуатационным затратам (повышению расхода топлива, затрат на ремонты из-за уменьшения долговечности и безотказности узлов, снижению мощности двигателя и др.). Нормативные значения этих показателей из-за различий в условиях эксплуатации не могут быть едиными. Поэтому их определение осуществляется дифференцированно для конкретных условий эксплуата-

ции с помощью статистического метода, учитывающего закономерности 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. Допускается, что полученное распределение содержит только те параметры, которые принадлежат исправным объектам. Значения же параметров, принадлежащих неисправным объектам, выйдут за пределы этого распределения.

Диагностические параметры, наиболее удаленные от номинального или среднего значения и принадлежащие полученному распределению, можно отнести к предельным. Однако, следует иметь в виду, что эти крайние значения диагностических параметров могут соответствовать как исправному, так и неисправному состоянию объекта. Поэтому, по аналогии с принятой в теории надежности методикой, область рассеивания диагностического параметра ограничивают пределами, соответствующими требуемому уровню вероятности исправной работы. Такое ограничение выбирается в учетом ошибок I и II рода, возможных при диагностировании.

Ошибка I рода (ложная неисправность) – это признание механизма неисправным, тогда как на самом деле он еще в исправном состоянии. Ошибка II рода (пропуск неисправности) – это признание механизма исправным, когда фактически он находится в неисправном состоянии.

Практика эксплуатации автомобилей показывает, что все значения диагностического параметра, находящиеся в пределах рассеивания $S_{п0,85}$, ограниченном уровнем вероятности $P \leq 0,85$, соответствуют исправному состоянию (рис. 5.19). Ошибка II рода (пропуск неисправности) при этом будет минимальна.

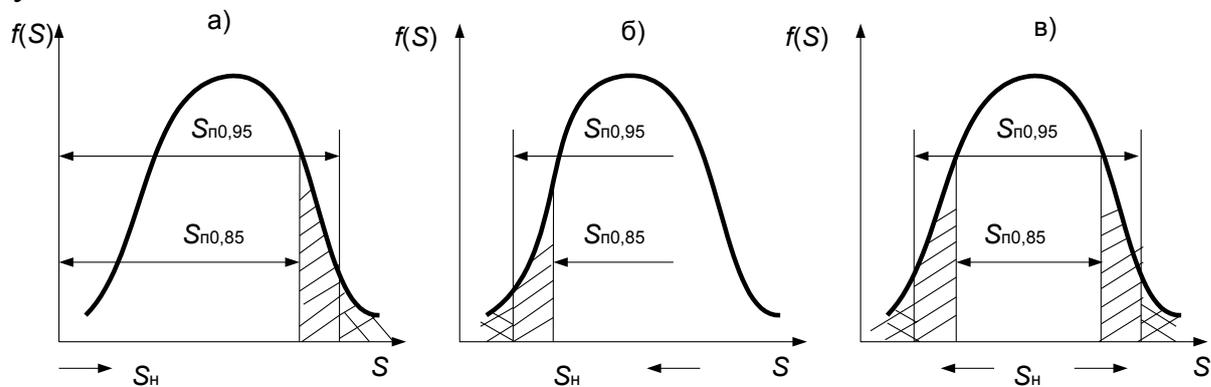


Рис. 5.19. Схема определения предельных значений диагностических параметров

Значения параметра, выходящие за пределы рассеивания $S_{п0,95}$, ограниченного уровнем вероятности $P \geq 0,95$, соответствуют неисправному состоянию и минимальному значению ошибки I рода.

Значения параметра внутри диапазона $S_{п0,85} - S_{п0,95}$ будут соответствовать как исправному, так и неисправному состоянию. Вероятности обоих состояний при этом можно считать одинаковыми, т.е. ошибки I и II рода составят примерно 5 %.

Предельные нормативы для наиболее ответственных механизмов (например, непосредственно влияющих на безопасность движения), ошибки II рода для которых должны быть минимальными, ограничиваются более жестким 85 %-м уровнем вероятности. Для остальных механизмов из экономических соображений указанное ограничение менее жесткое – 95 %.

В зависимости от закономерностей изменения диагностического параметра его рассеивание может быть ограничено с одной (рис. 5.19, а, б) или с двух сторон (рис. 5.19, в).

Зная закон распределения диагностического параметра и принятый уровень вероятности P (0,85 или 0,95), определяют его предельные нормативы. Для нормального закона, например, при двухстороннем ограничении они составят

$$S_{п0,85} = S_{ср} \pm 1,5 \sqrt{D_s}; \quad S_{п0,95} = S_{ср} \pm 2,0 \sqrt{D_s}, \quad (5.9)$$

где D_s – дисперсия распределения диагностического параметра.

При одностороннем (верхнем) ограничении предельные нормативы равны

$$S_{п0,85} = S_{ср} + \sqrt{D_s}; \quad S_{п0,95} = S_{ср} + 1,7 \sqrt{D_s}. \quad (5.10)$$

При монотонном изменении параметра в качестве нормативных показателей целесообразно использовать не предельное $S_{п}$, а допустимое $S_{д}$ значение параметра. *Допустимый диагностический норматив* представляет собой ужесточенную величину предельного норматива, которая обеспечивает исправную работу механизма на межконтрольном пробеге. Он является основным нормативом при постоянной периодичности диагностирования, когда известна закономерность изменения диагностического параметра данного объекта. Предположим, что функция изменения диагностического параметра имеет вид

$$S = S_{н} + vt^{\alpha}, \quad (5.11)$$

где S_n – начальное значение параметра; v – интенсивность изменения параметра; l – наработка; α – показатель степени, определяющий характер изменения параметра.

Тогда, зная межконтрольный пробег l_d , величину предельного норматива S_n и скорость изменения параметра v , значение допустимого норматива определяется по формуле

$$S_d = v \left(\sqrt[\alpha]{\frac{S_n}{v}} - l_d \right). \quad (5.12)$$

5.4.4. Прогнозирование остаточного ресурса машин

Одной из основных задач диагностирования является прогнозирование остаточного ресурса объекта, под которым понимается определение продолжительности его исправной работы до возникновения предельного состояния. Учитывая то, что диагностирование автомобилей проводится в основном периодически по плану, задача прогнозирования заключается в определении возможности их исправной работы до очередного ТО. Практически прогнозирование заключается в определении оптимальной периодичности диагностирования и допустимых диагностических нормативов.

В основе определения оптимальной периодичности диагностирования агрегата, узла, как и обоснование регламентной периодичности технического обслуживания, лежат закономерности изменения их технического состояния и экономические показатели (удельные затраты на поддержание работоспособного состояния).

Обосновав оптимальную периодичность диагностирования l_d каждого механизма, приурочивают их к плановой периодичности соответствующего вида технического обслуживания l_p .

Определение периодичности диагностирования при оценке технического состояния автомобиля может осуществляться несколькими методами в зависимости от выбранного критерия оптимизации.

Метод определения периодичности диагностирования по допустимому уровню вероятности безотказной работы (рис. 5.20)

Метод основан на выборе такой периодичности диагностирования l_d ,

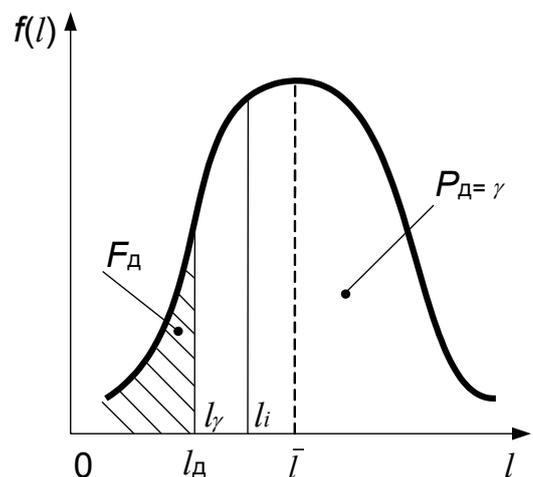


Рис. 5.20. Схема определения оптимальной периодичности диагностирования по допустимой вероятности безотказной работы

при которой вероятность отказа не превышает установленной величины F_d . Для обеспечения безотказной работы объекта должно выполняться условие:

$$P(l_i \geq l_\gamma) \geq P_d = \gamma, \quad (5.13)$$

где l_i – наработка объекта на отказ;

γ – допустимый уровень вероятности безотказной работы; l_γ – наработка, соответствующая оптимальной периодичности l_d .

Оптимальное значение периодичности l_d определяется из выражения

$$F_d = 1 - P_d = \int_0^{l_d} f(l) dl. \quad (5.14)$$

Допустимый уровень безотказной работы принимается равным $P_d = 0,95$ для узлов и систем, обеспечивающих безопасность движения автомобиля, и $P_d = 0,85 - 0,90$ – для прочих элементов.

Несмотря на простоту использования, метод обладает существенным недостатком. При значительных вариациях изменения технического состояния он не может обеспечить необходимую точность и эффективность оценки технического состояния объекта диагностирования.

Определение периодичности диагностирования по частной реализации диагностического параметра

Метод предполагает наличие функции изменения диагностического параметра по наработке от начального S_n до предельного S_n значений (5.11). Пользуясь этой функцией, можно определить полный l_d и остаточный l_o ресурсы диагностируемого механизма после некоторой наработки l_i (рис. 5.21).

$$l_{\Pi} = \alpha \sqrt{\frac{|S_{\Pi} - S_n|}{v}}; \quad (5.15)$$

$$l_o = l_i \left(\alpha \sqrt{\frac{|S_{\Pi} - S_n|}{|S_i - S_n|}} - 1 \right), \quad (5.16)$$

где S_i – значение диагностического параметра после наработки l_i .

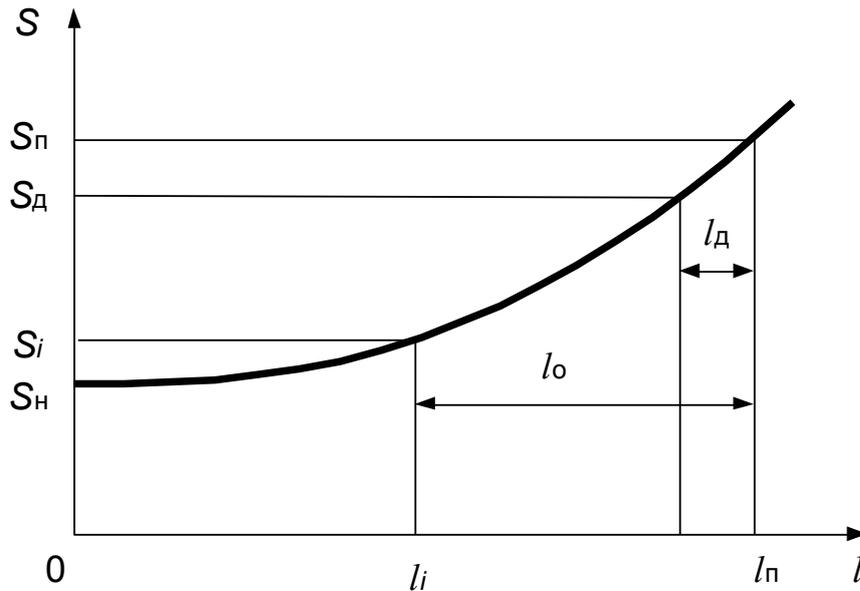


Рис. 5.21. Схема определения периодичности диагностирования по частной реализации диагностического параметра

В случае, когда диагностирование выполняют при проведении планового ТО, т.е. когда $l_d = l_p$, прогнозирование исправной работы автомобиля осуществляется сравнением остаточного ресурса l_o и периодичности l_p . Если $l_o > l_p$, состояние диагностируемого механизма обеспечит его исправную работу до очередного ТО. В случае, если $l_o < l_p$, возникает необходимость в проведении ремонта. Процедуру прогнозирования можно упростить, заменив предельный диагностический норматив S_p допустимым S_d . Для этого ужесточают значение S_p на величину приращения диагностического параметра за период l_p .

Определение периодичности диагностирования

по технико-экономическим показателям

с учетом вероятности безотказной работы агрегата

Метод предполагает разбивку кривой изменения вероятности безотказной работы на линейные участки АВ, ВВ и т.д. (рис. 5.22). В этом случае интенсивность изменения вероятности безотказной работы $P(l)$ на каждом участке постоянна.

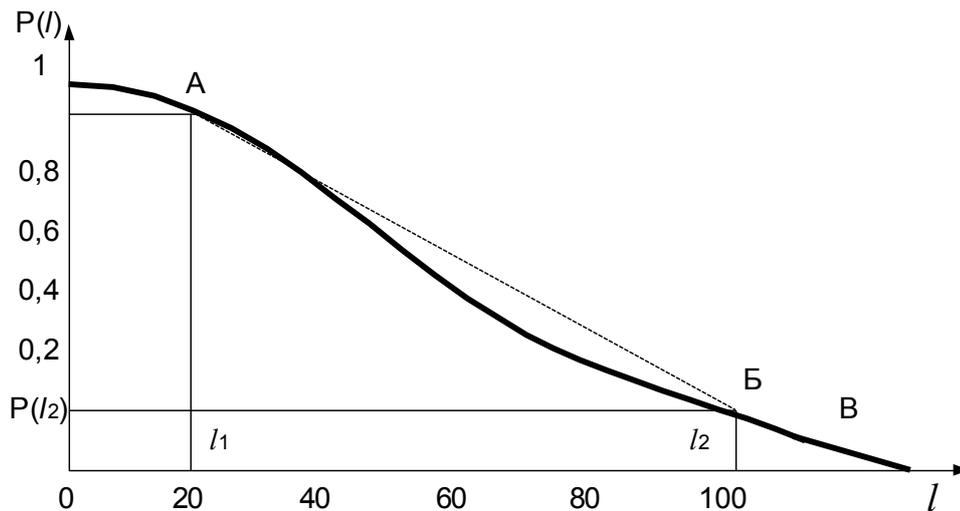


Рис. 5.22. Изменение вероятности безотказной работы диагностируемого объекта $P(l)$ по наработке l

Суть технико-экономического метода заключается в определении суммарных затрат на поддержание работоспособности объекта с учетом изменения вероятности его безотказной работы и последующей их минимизации. Общие затраты на эксплуатацию диагностируемого агрегата определяются по формуле

$$C_{\Sigma} = C_o + C_{\text{пр}} + C_{\text{ар}} + C_{\text{нр}} + C_d, \quad (5.17)$$

где C_o , $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{ар}}$, C_d – затраты на обслуживание, плановые ремонты, аварийные ремонты, диагностирование; $C_{\text{нр}}$ – затраты, связанные с несвоевременностью замены узлов (недоработкой ресурса).

Периодичность диагностирования определяется на участке АБ, соответствующем интервалу наработки от l_1 до l_2 и снижению вероятности безотказной работы от $P(l_1)$ до $P(l_2)$. Функция C_{Σ} является целевой функцией, в связи с чем ее экстремальное значение соответствует оптимальному решению.

В инженерной практике определение минимума целевой функции C_{Σ} , а следовательно, оптимального значения периодичности диагностирования l_d чаще выполняется графически (рис. 5.23).

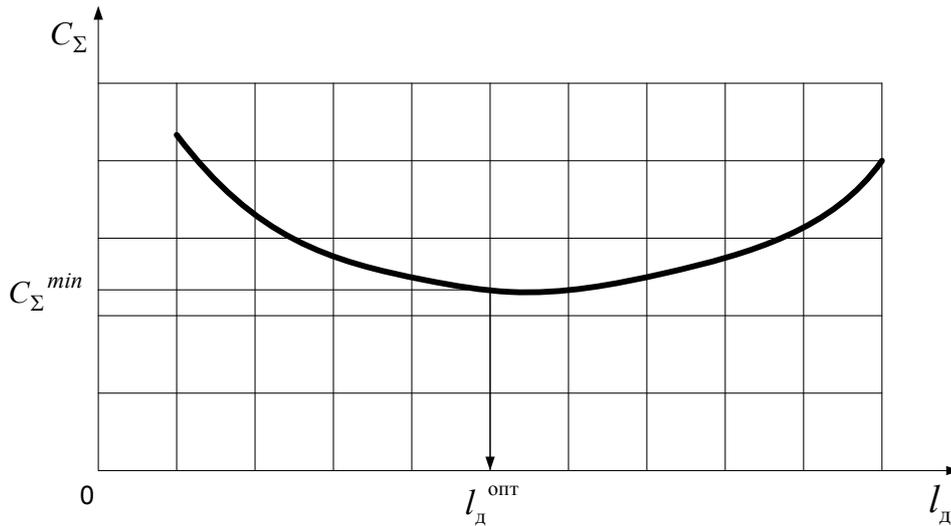


Рис. 5.23. Схема определения оптимальной периодичности диагностирования технико-экономическим методом

При определении $l_{д}^{опт}$ можно выполнить и аналитическую минимизацию функции C_{Σ} , если известны реализации всех составляющих выражения (5.17). Вычисления проводятся дифференцированием целевой функции C_{Σ} по наработке l . Решение этого уравнения позволяет определить искомую оптимальную периодичность диагностирования конкретного объекта $l_{д}^{опт}$.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные конструктивные методы обеспечения надежности машин.
2. Какие требования предъявляются к материалам деталей, используемым в парах трения?
3. Какие требования обеспечения ремонтпригодности предъявляются к современным автомобилям?
4. С какой целью используют резервирование элементов и систем автомобиля?
5. Перечислите наиболее важные технологические мероприятия повышения надежности автотранспортных средств.
6. Какие методы упрочнения рабочих поверхностей используются в современном автомобилестроении?
7. Какие факторы оказывают влияние на показатели надежности автомобилей в эксплуатации?

8. Что понимается под «технической диагностикой» и «диагностированием» автомобилей?

9. Назовите основные требования к выбору диагностических параметров.

10. Какие методы используются при нормировании диагностических параметров?

11. Что понимается под прогнозированием остаточного ресурса машин?

12. Перечислите методы определения оптимальной периодичности диагностирования автомобилей.

Заключение

В настоящем учебном пособии, рассчитанном на студентов специальностей «Автомобили и автомобильное хозяйство» и «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования», рассмотрены теоретические и практические вопросы основ теории надежности машин.

Раскрыты общие понятия науки о надежности, определения качества, основных свойств надежности, исправного, работоспособного и предельного состояний машин. Приведена классификация отказов автотранспортных средств, количественные показатели для оценки их безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также показатели для комплексной оценки нескольких свойств надежности одновременно.

Рассмотрены инженерно-физические основы надежности, устанавливающие основные причины потери машиной работоспособности (усталость металлов, остаточные деформации, старение, коррозия, изнашивание). Учитывая, что основной причиной отказа является изнашивание, в пособии достаточно внимания уделено его физической сущности и факторам, влияющим на износостойкость изделий. Приведены основные методы испытания автомобилей на надежность, а также различные способы их ускорения.

Порядок сбора и обработки статистической информации об отказах автомобилей, описываемых разными законами распределения, показан на конкретных примерах. Полученная после обработки информация о надежности позволяет выявить слабые места в конструкции автомобиля, разработать конкретные мероприятия по повышению их долговечности и ра-

циональную систему поддержания автотранспортных средств в работоспособном состоянии.

Работы по созданию высоконадежных машин ведутся на всех этапах их конструирования, изготовления, испытаний и эксплуатации. В пособии изложены современные методы обеспечения надежности автомобилей, начиная с этапа проектирования и заканчивая их эксплуатацией.

Приведенный в пособии материал отражает вопросы, недостаточно освещенные в ранее опубликованной учебной литературе по автомобильному транспорту, поэтому, несомненно, окажет помощь студентам, изучающим дисциплины «Основы теории надежности машин» и «Основы работоспособности технических систем» при подготовке специалистов автомобильного транспорта.

Библиографический список

1. Авдонькин Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей. М.: Транспорт, 1985. – 216 с.
2. Аринин И.Н., Коновалов С.И., Баженов Ю.В. Техническая эксплуатация автомобилей / Серия «Высшее профессиональное образование». – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 315 с. ISBN 5-222-05-101-3.
3. Безверхний С.Ф., Яценко Н.Н. Основы технологии полигонных испытаний и сертификация автомобилей. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 600 с. ISBN 5-7050-460-5.
4. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистики: учеб.пособие для вузов / В.Е.Гмурман. – М.: Высш.шк., 1975. – 333с.
5. ГОСТ 27002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введен 01.07.90. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 38с.
6. Гурвич И.Б., . Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей. / И.Б.Гурвич, П.Э, Сыркин. - М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
7. Емелин М.И., Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации. / М.И.Емелин, А.А.Герасименко. -М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
8. Завадский В.Ю. Статистическая обработка эксперимента в задачах автомобильного транспорта: учеб.пособие / В.Ю.Завадский : МАДИ. – М., 1982. – 136с.

9. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем : Учебник для вузов. М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с. ISBN 5-902048-51-6.
10. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. М.: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с. ISBN 5-7050-006-5.
11. Кугель Р.В. Испытания на надежность машин и их элементов. М.: Машиностроение, 1982. – 181 с.
12. Кузьмин Н.А. Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации: Уч. пособие/ Нижегород. гос. ун-т., Нижний Новгород, 2002. – 142 с. ISBN 5-93272-123-5.
13. Купцова Г.К., Купцов В.И., Керимов Ф.Ю. Обработка информации о надежности машин. Алгоритмы и расчеты: Уч. пособие / МАДИ – М., 1981. – 88 с.
14. Мирошников Л.В., Болдин А.П., Пал В.И. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях. М.: Транспорт, 1977. – 263 с.
15. Проников А.С. Надежность машин. М.:Машиностроение, 1978. – 532 с.
16. Российская автотранспортная энциклопедия. Т.3. Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт автотранспортных средств: Справ. и науч.-практ. пособие. М.: РООИП, 2000. – 456 с.
17. Ротенберг Р.В. Основы надежности системы водитель - автомобиль – дорога - среда. М.: Транспорт, 1986. – 215 с.
18. Справочник. Надежность в машиностроении./ Под общ. ред. Шашкина В.В. и Карзова Г.П. СПб.: Политехника , 1992. – 719 с. ISBN 5-7325-0186-X.
19. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов/Под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Наука, 2001. – 535 с. ISBN 5-02-002593-3.
20. Шейнин А.М. Основные принципы управления надежностью машин в эксплуатации. М.: Знание, 1977. – 44 с.

БАЖЕНОВ Юрий Васильевич

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Учебное пособие

Редактор Е.А. Амирсейидова

Компьютерная верстка М.А. Перевозниковой

ЛР №020275. Подписано в печать .

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать на ризографе. Усл.-печ.л. . Уч.-изд.л. . Тираж экз.

Редакционно-издательский комплекс

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул.Горького,87